PNC TN8410 96-203

公開資料

釜石鉱山における地下水の地球化学的研究(Ⅰ)

１９９６年10月

動力炉・核燃料開発事業団
東　海　事　業　所

複製又はこの資料の入手については，下記にお問い合わせ下さい。
〒319－11　茨城県那珂郡東海村大字村松４－３３
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所　技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)1996

Ⓐ

公　開　資　料
PNC TN8410 96-203
1 9 9 6 年 1 0 月

釜石鉱山における地下水の地球化学的研究（Ⅰ）

笹本　広[1)]，瀬尾俊弘[2)]，油井三和[1)]，佐々木康雄[1)]

要　旨

釜石鉱山における原位置試験は，主に栗橋花崗閃緑岩を対象として行われている。栗橋花崗閃緑岩中の地下水の地球化学的特性を把握するため，第２フェーズの平成６年度までに取得された地下水の地球化学データをとりまとめ，実測された地下水水質の特性や深度依存性に係わる特徴を整理した。また岩石・鉱物データおよび地下水水質データをもとに地球化学コード（EQ3/6)を利用した熱力学的解析により，地下水水質形成機構に関する予察的考察を行った。

以下に主な結果をまとめる。

・地下水の起源は降水である。

・ほとんどの地下水にはトリチウムが検出されることから，これらの地下水の滞留時間は長くとも40年程度である。一方，KH-1孔の地下水にはトリチウムが検出されないことから，KH-1孔には，より古い地下水が存在すると推定される。

・比較的浅部の地下水は$Ca-HCO_3$型であるが，より深部になると$Na-HCO_3$型になるような深度方向での水質タイプの変化が認められる。

・深度方向での水質タイプの変化（$Ca-HCO_3$型⇨$Na-HCO_3$型）の原因としては，方解石の沈澱や沸石類等によるイオン交換反応の影響が考えられる。

・地下水水質の熱力学的解析から，pH９以上の地下水のpH，主要イオン（Na^+，Ca^{2+}，HCO_3^-）およびSiO_2濃度に関しては，鉱物－水反応を平衡論的に考察することで説明できる可能性があると考えられる。

---

1)東海事業所　環境技術開発部　地層処分開発室
2)本社　環境技術開発推進本部　地層科学研究グループ

Geochemical Investigation of Groundwater in the Kamaishi In-Situ Tests Site, Japan (Part 1)

Hiroshi SASAMOTO[1], Toshihiro SEO[2], Mikazu YUI[1], Yasuo SASAKI[1]

ABSTRACT

Kamaishi In-Situ tests have been carried out in the Kurihashi granodiorite. Geochemical data of groundwater which have been collected from March 1989 to March 1995 were compiled in order to understand geochemical characteristics in the Kurihashi granodiorite, and in order to identify their dependencies on depth.

Preliminary consideration of groundwater evolution in the Kurihashi granodiorite have been also performed by thermodynamic calculation by using geochemical code (EQ3/6).

The results were summarised as follows.

- The grondwater in the Kurihashi granodiorite is meteoric origin.
- The age of most of the groundwaters may be less than 40 years, however, the older groundwater which have been recharged more 40 years may be exist in the KH-1 borehole.
- The groundwater type changes from Ca-HCO_3 to Na-HCO_3 with depth.
- The change of groundwater type with depth may be interpreted by calcite precipitation and ion exchange reaction of zeolite.
- The results of thermodynamic calculation of the groundwater indicate that ionic concentration (Na^+, Ca^{2+}, HCO_3^-) and SiO_2 concentration of the groundwater over pH9 might be dominated by equilibrium between minerals and water.

---

1) Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC)
Tokai Works Waste Technology Development Division
Geological Isolation Technology Section (GIS)
2) PNC Head Office Geoscience Research Program

目次

1．はじめに ……1

2．栗橋花崗閃緑岩に係わる地球化学データ
2．1　地下水の地球化学データ
2．1．1　地表水および地下水の採水位置 ……1
2．1．2　地表水および地下水の採水方法 ……8
2．1．3　物理化学パラメータ測定及び水質・同位体・ガス・微生物分析項目……11
2．1．4　物理化学パラメータ測定及び水質・同位体・ガス・微生物分析方法……12
2．1．5　物理化学パラメータ測定及び水質・同位体・ガス・微生物分析結果……19
2．2　岩石・鉱物の地球化学データ
2．2．1　採水を実施した試錐孔コアの岩石・鉱物データ ……26
2．2．2　坑道壁面から採取した試料の岩石・鉱物データ ……27
2．3　地下水データに基づく水質の特徴
2．3．1　地下水の水素・酸素同位体比 ……28
2．3．2　地下水の水質 ……31

3．水質形成機構に関する予察的考察
3．1　KG-1孔の地下水の酸化還元状態 ……38
3．2　地下水のpH，主要なイオン（Na^+，Ca^{2+}，HCO_3^-）およびSiO_2濃度を支配する鉱物－水反応 ……40
3．3　平衡論的アプローチの適用性 ……52
3．4　深度方向での水質タイプの変化 ……53

4．まとめ ……56

5．今後の課題 ……57

6．謝辞 ……58

7．参考文献 ……58

図表類

表－1　550mレベル坑道における地下水採水位置の概要 …… 9
表－2　250mレベル坑道における地下水採水位置の概要 ……10
表－3　地表水，坑道湧水，KH-1孔地下水の水質・同位体分析方法 ……14
表－4　KG-1孔地下水の物理化学パラメータ測定・水質・同位体
・ガス・微生物分析方法…15
表－5.1 地表水・地下水の物理化学パラメータ測定・水質
および同位体分析結果（その1）…20
表－5.2 地表水・地下水の物理化学パラメータ測定・水質
および同位体分析結果（その2）…21
表－5.3 地表水・地下水の物理化学パラメータ測定・水質
および同位体分析結果（その3）…22
表－6　KG-1孔地下水の物理化学パラメータ測定・ガス・水質
・同位体・微生物分析結果 ……23
表－7　相平衡図の作成に用いた鉱物の平衡定数（Stumm et al., 1981） ……43

図－1　釜石鉱山位置図 …… 2
図－2　釜石鉱山周辺の地質図（1/50,000） …… 3
図－3　地表水測定・採水位置図（1/25,000） …… 4
図－4　550mレベル坑道における地下水の測定・採水位置図（1/5,000） …… 5
図－5　250mレベル坑道における地下水の測定・採水位置図（1/5,000） …… 6
図－6　KH-1およびKG-1における地下水の測定・採水位置図 …… 7
図－7　地表水および地下水のイオンバランスのチェックの結果……24
図－8　地表水および地下水のδD－δ^{18}O図 ……29
図－9　地表水および地下水のトリチウム濃度と深度との関係 ……30
図－10　地表水および地下水の電気伝導度，蒸発残留物量と深度との関係 ……32
図－11　地表水および地下水のpH，SiO_2濃度と深度との関係 ……33
図－12　地表水および地下水のNa+，Ca++ 濃度と深度との関係 ……34
図－13　地表水および地下水の炭酸濃度，硫酸濃度と深度との関係 ……35
図－14　地表水および地下水の化学組成のキーダイヤグラム ……37
図－15　原位置（計算値）と地表（測定値）でのpH，Ehの値
（Laaksoharju et al., 1993）…39
図－16　水界堆積物中で進行する微生物過程の深度による相違（Jorgensen., 1980）…39
図－17　硫酸塩還元細菌の耐性領域図（35℃）（Fukunaga et al., 1995） ……41

図－18　地表水および地下水と鉱物の相平衡図 ……44
図－19　EQ3/6 による釜石地下水に対する各鉱物の飽和指数計算結果（その１）……46
図－20　EQ3/6 による釜石地下水に対する各鉱物の飽和指数計算結果（その２）……47
図－21　EQ3/6 による釜石地下水に対する各鉱物の飽和指数計算結果（その３）……48
図－22　地表水および地下水のpHとNa+, Ca++ , 炭酸濃度の関係 ……54
図－23　EQ3/6 による釜石地下水に対する方解石の飽和指数計算結果 ……55

1．はじめに

釜石鉱山における原位置試験は，第１フェーズ（昭和63年３月～平成５年３月）が終了し，現在，第２フェーズ（平成５年４月～平成10年３月）の段階にある。原位置試験は，釜石鉱山に分布する栗橋花崗閃緑岩を主な対象として行われている。

釜石鉱山における原位置試験では「地下深部の地質環境特性に関するデータを取得し，地下で生ずる現象を把握する」ことを目標の１つとして試験が実施されている。地質環境特性の１つである「地下水の地球化学的特性」に関しては，第１フェーズおよび第２フェーズにおいて以下の調査研究が行われている。

第１フェーズでは，550mレベル坑道（標高約575mに掘削された坑道の通称）を主な調査場所とし地下水の調査を実施するとともに，地表水やKH-1孔（550mレベル坑道から鉛直下向きに約500m掘削された試錐孔），KG-1孔（地表から鉛直下向きに約800m掘削された試錐孔）の地下水の調査も行い，地表水および栗橋花崗閃緑岩中の深部地下水の地球化学データを取得した。

第２フェーズでは，第１フェーズでの調査箇所に新たに250mレベル坑道（標高約258mに掘削された坑道の通称）も加えて地下水の調査を行い，地下水水質の深度依存性を把握するとともに，地下水の水質形成機構に関する考察も行っている。

本報告書では，第１フェーズおよび第２フェーズの平成６年度までに取得した栗橋花崗閃緑岩中の地下水の地球化学的データをとりまとめるとともに，栗橋花崗閃緑岩中の地下水水質の特性や水質の深度依存性等に係わる特徴を整理し，地下水の水質形成機構に関する予察的な考察を行った。

2．栗橋花崗閃緑岩に係わる地球化学データ

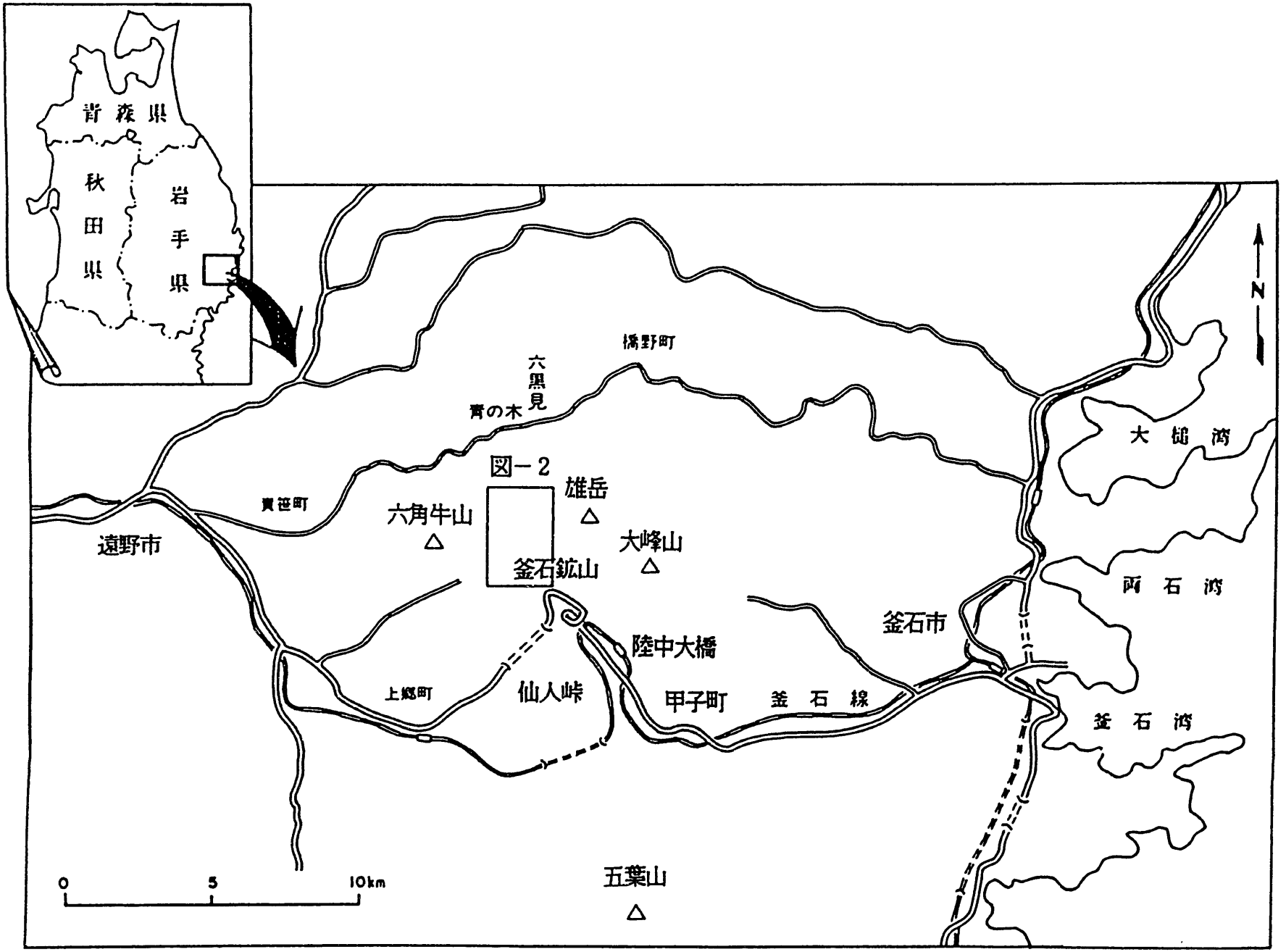
2．1　地下水の地球化学データ

2．1．1　地表水および地下水の採水位置

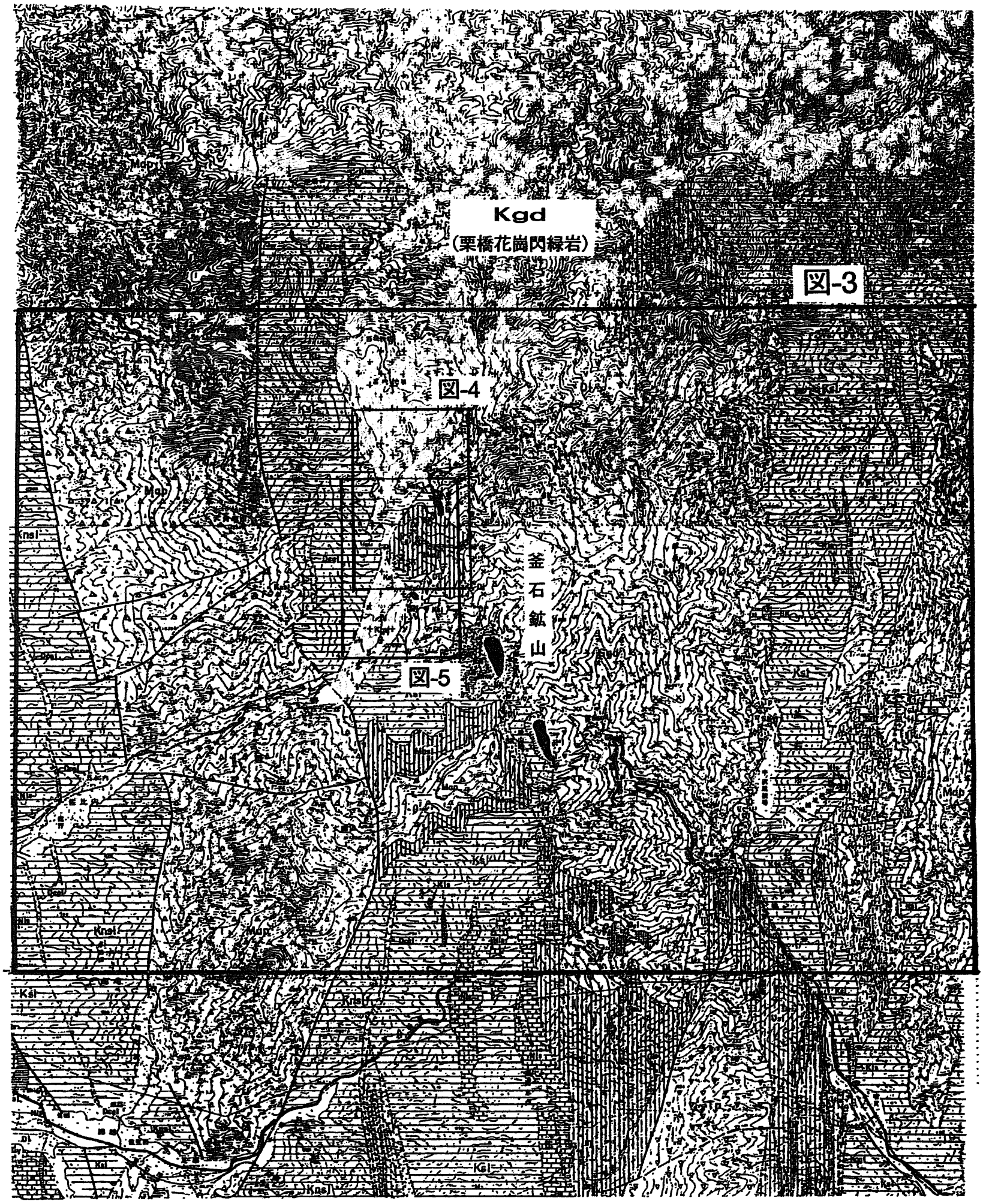
釜石鉱山は岩手県釜石市街地の西方約20kmに位置する（図－１）。釜石鉱山周辺の地質に関しては，浜辺ほか（1976）により詳細に報告されている。原位置試験の主な対象である栗橋花崗閃緑岩は，主に釜石鉱山の北方向に分布している（図－２）。これまでに採水を実施した地表水および地下水の採水位置を図－３～６に示す。

(1)　地表水（図－３）

地表水の採水位置は，青の木およびＳ－１～４の５箇所である。青の木（標高785m）およびＳ－１（標高815m）の試料は栗橋花崗閃緑岩体の地表部，Ｓ－２（標高650m）は古生層の地表部，Ｓ－３（標高588m）は蟹岳花崗閃緑岩の地表部，Ｓ－４（標高800m）は蟹岳閃緑岩の地表部において，各々，採水したものである。なお，いずれの地表水も沢水を採水したものである。


青森県
秋田県
岩手県
N
橋野町
六黒見
青の木
図－2
雄岳
六角牛山
大峰山
釜石鉱山
遠野市
宮古町
大槌湾
両石湾
釜石市
陸中大橋
上郷町
仙人峠
甲子町
釜石線
釜石湾
0
5
10km
五葉山

図－１　釜石鉱山位置図



凡　例

時代		地層名	岩相	略号
中世代	白亜紀	馬木の内層	石英安山質～安山岩質火砕岩類	Map
			礫岩・砂岩・粘板岩	Mas
古生代	二畳紀	金山層	粘板岩類	Ksl
			礫岩(大洞礫岩)	Dcgl
		松倉層	砂岩・粘板岩	Msl
		甲子層	安山岩質火砕岩類	Kp
			粘板岩類	Ksl
			石灰岩	Kls
			礫岩(基底礫岩)	Kgl
	石炭紀	唄貝層	粘板岩	Usl
			石灰岩	Uls
		長岩・鬼丸層	石灰岩	Nls
			砂岩・粘板岩	Nsl
		大陽・寒倉層	粘板岩類	Osl
			石灰岩	Ols
		土倉層	安山岩質火砕岩類	Tp

火成岩類	釜石岩体	花崗閃緑岩	Grd/Tgd
		花崗閃緑岩	Ggd
		斑糲岩	Gb
		モンゾニ岩	Mz
		閃緑岩－閃緑玢岩	Di
	五葉山岩体	花崗閃緑岩	Grgd
	その他の火成岩類	花崗斑岩	Gp
		珪岩頭	P
		斑糲岩	Pgb
		超塩基性岩	Um
鉱床		鉄鉱体	
		スカルン	SK

断層

推定断層

0　2km

図-2　釜石鉱山周辺の地質図（1/50，000）

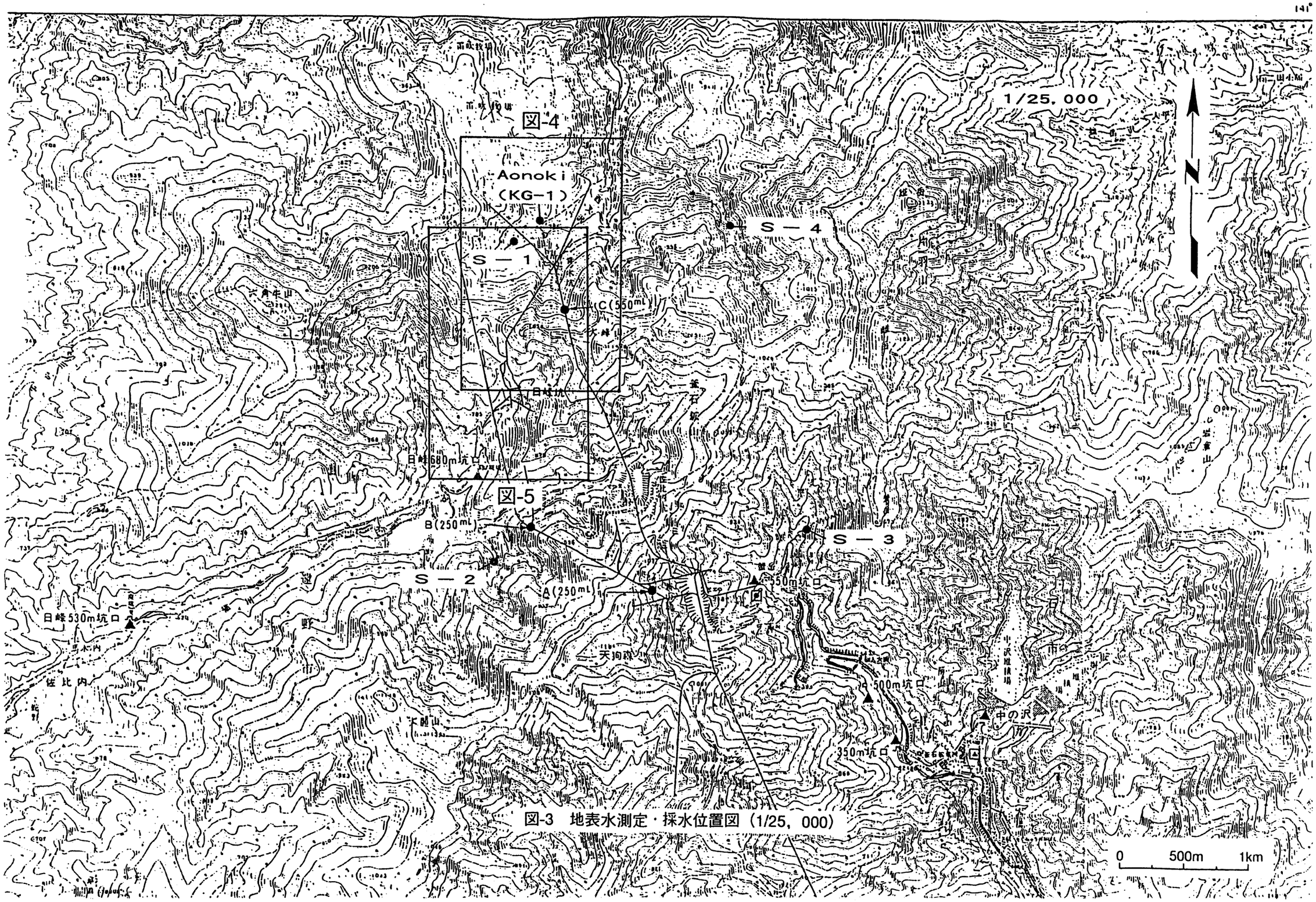


図-3　地表水測定・採水位置図（1/25，000）

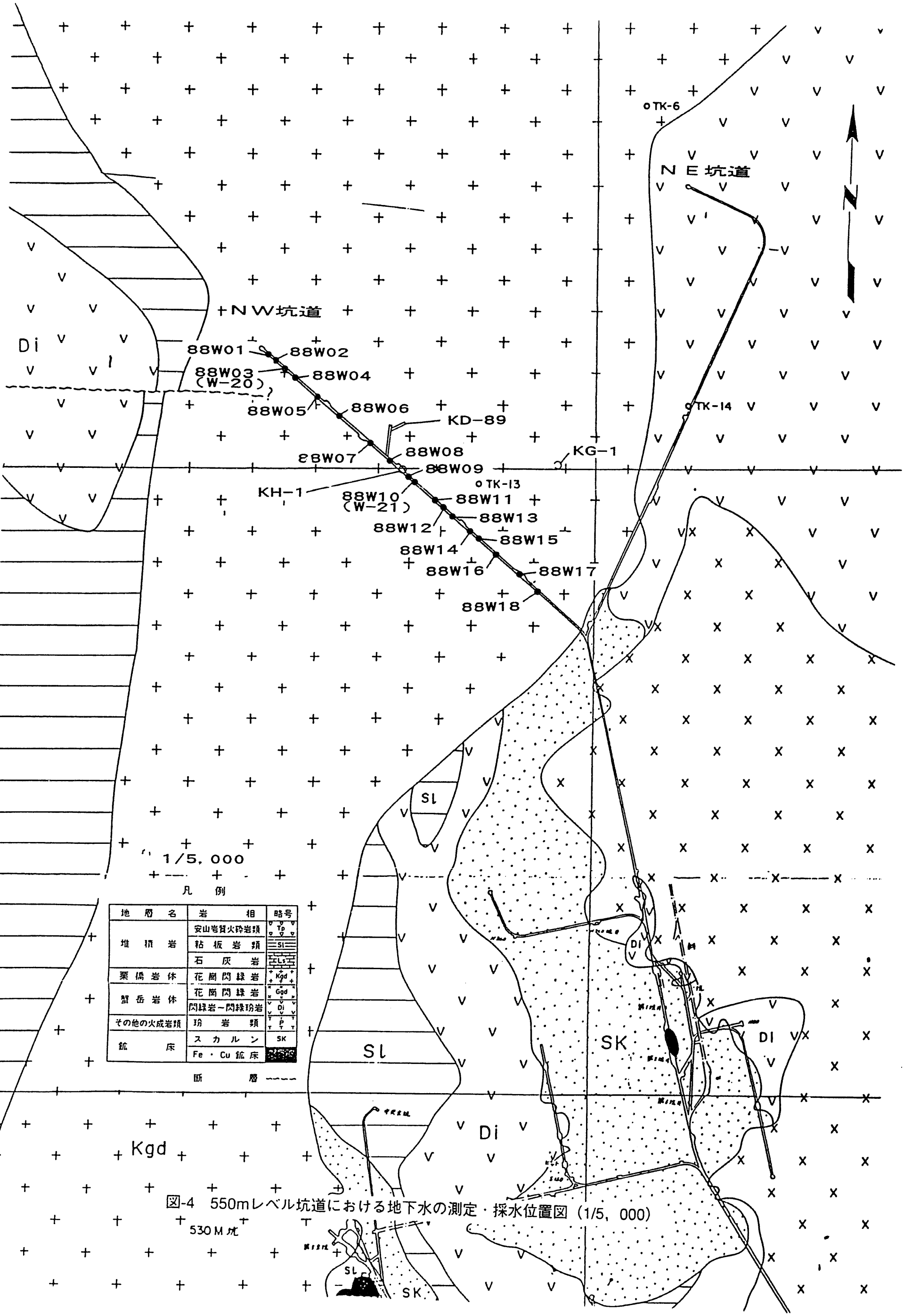


図-4　550mレベル坑道における地下水の測定・採水位置図（1/5，000）

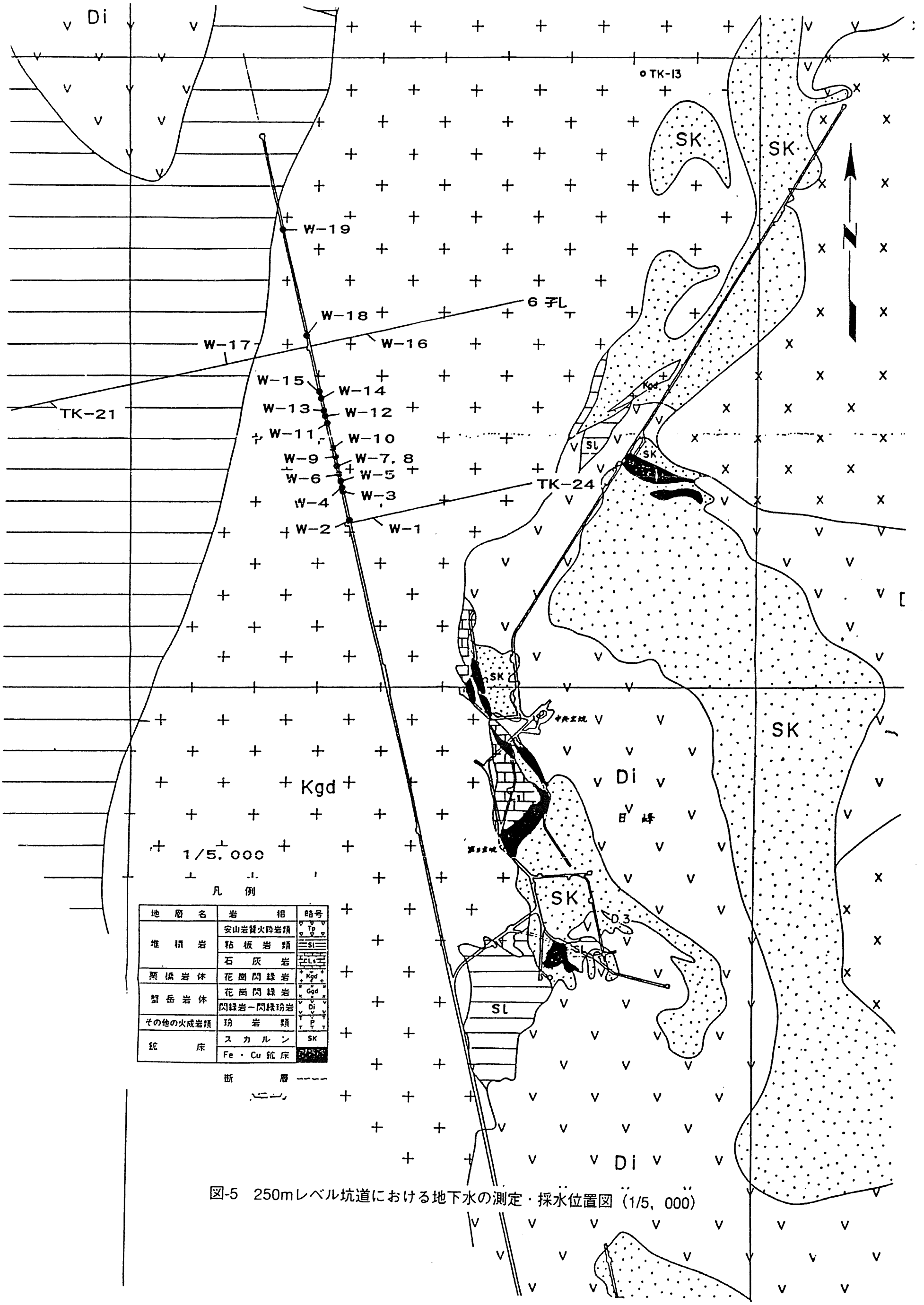


図-5　250mレベル坑道における地下水の測定・採水位置図（1/5, 000）

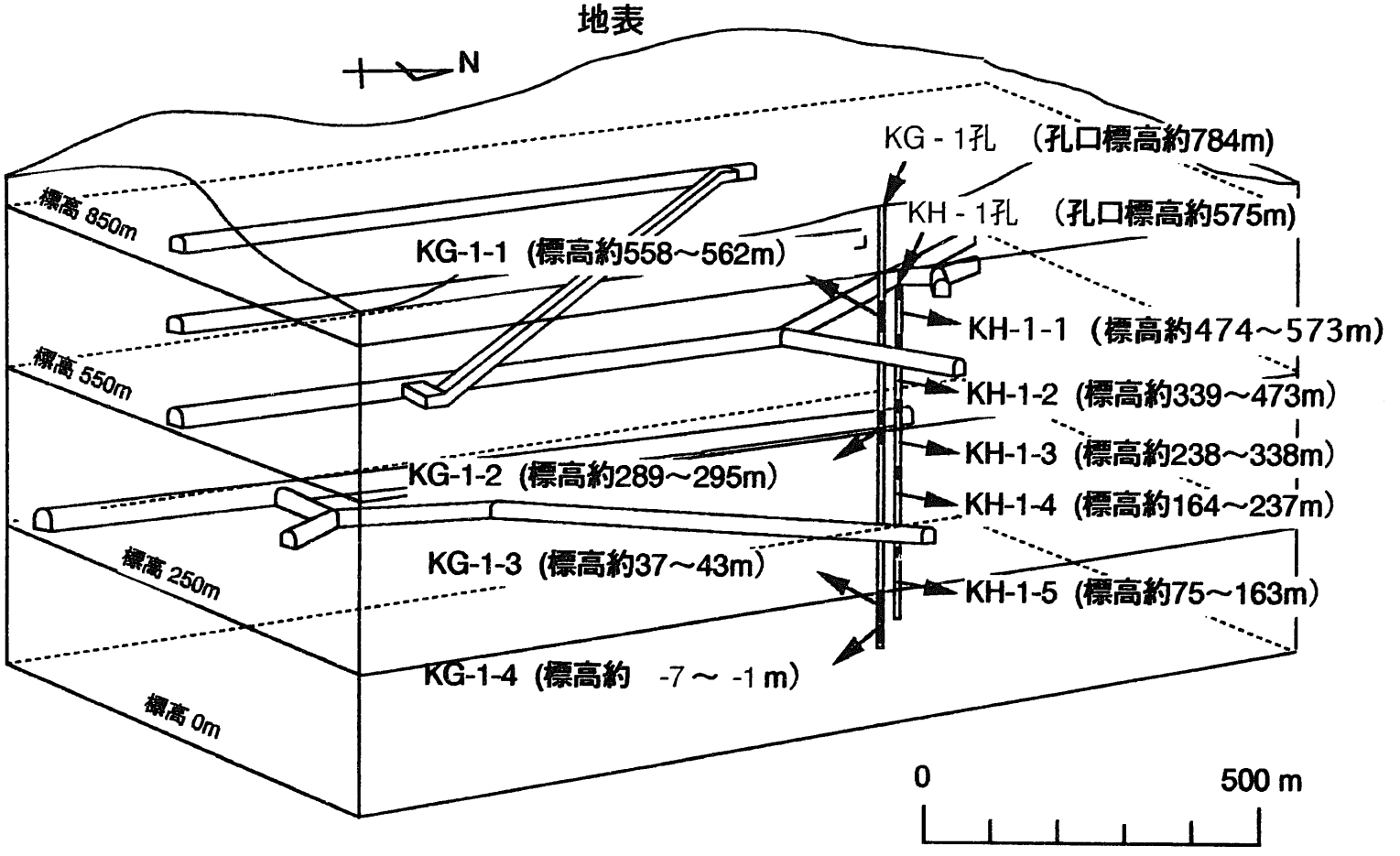


図-6 KH-1孔およびKG-1孔における地下水の測定・採水位置図

(2) 550mレベル坑道（標高約575m）の地下水（図－4）

原位置試験は，550mレベル坑道のNW坑道とNE坑道において実施されている。このうち栗橋花崗閃緑岩が分布するのは，NW坑道である。NW坑道の壁面における坑道湧水の採水位置は，88W01～18までの18箇所である。その他に，NW坑道の途中から新たに掘削されたKD－89坑道内の4箇所においても採水を実施した。表－1には，550mレベル坑道における地下水採水位置の概要をまとめてある。

(3) 250mレベル坑道（標高約258m）の地下水（図－5）

250mレベル坑道における原位置試験は，地下水の採水箇所であるW1付近から坑道奥（すなわち北方向）に向かっての約600mの区間で実施されている。250mレベル坑道での採水位置は，W1～19の19箇所である。このうちW1，W16およびW17は，既存試錐孔であるTK－24孔，6孔およびTK－21孔からの湧水に相当する。表－2には250mレベル坑道における地下水採水位置の概要をまとめてある。

(4) KH-1孔（孔口標高約575m）・KG-1孔（孔口標高約784m）の地下水（図－6）

KH-1孔は550mレベル坑道から鉛直下向きに，栗橋花崗閃緑岩中に約500m掘削された試錐孔である。KH-1孔での採水位置はKH-1-1～5 の5区間（KH-1-1：標高約474 ～573m，KH-1-2：標高約339 ～473m，KH-1-3：標高約238 ～338m，KH-1-4：標高約164 ～237m，KH-1-5：標高約75～163m）である。

KG-1孔は地表（青の木）から鉛直下向きに，栗橋花崗閃緑岩中に約800m掘削された試錐孔である。KG-1孔での採水位置はKG-1-1～4 の4区間（KG-1-1：標高約558 ～562m，KG-1-2：標高約289 ～295m，KG-1-3：標高約37～ 43m，KG-1-4：標高約-7～-1m）であり採水区間長は，各々，約6mである。

2．1．2 地表水および地下水の採水方法

地表水および地下水の採水は，採水場所に応じて以下の様な方法で実施した。採水前のサンプル瓶の共洗いは，3回程度おこなった。

(1) 地表水

地表水の場合，沢水による共洗い後，サンプル瓶に採取した。

(2) 坑道湧水（550mおよび250mレベル）

坑道湧水の場合，湧水量に応じて取水方法を工夫した。湧水量が少ない場合は，割れ目の湧水部にビニールチューブを差し込み湧水を採取したり，坑道天盤の湧水割れ目の一部をビニールシートで覆い滴水を集めて採取した。250mレベル坑道の既存試錐孔であるTK－24孔，6孔およびTK－21孔においては，湧水量が多いので，試錐孔からの湧水をサンプル瓶にオーバーフローさせながら気泡が入らないように採取した。

表-1　550mレベル坑道における地下水採水位置の概要

測定・採水箇所	湧水箇所（NW/NE坑道の分岐からの距離）	湧水量（1988年測定）	備考
88W01(NW坑道)	坑道天盤（685m）	200cc/min.	湧出部は褐色を帯びる
88W02(NW坑道)	坑道天盤（666.5m）	360cc/min.	
88W03(NW坑道)	坑道西壁（640m）	10,000cc/min.	湧出部は濃褐色を帯びる
88W04(NW坑道)	坑道天盤（631.8m）	500cc/min.	湧出部は褐色に変色
88W05(NW坑道)	坑道天盤（575.2m）	100cc/min.	
88W06(NW坑道)	坑道天盤（535.5m）	20cc/min.	
88W07(NW坑道)	坑道東壁（474.5m）	630cc/min.	湧出部は褐色を帯びる
88W08(NW坑道)	坑道天盤（405.3m）	5cc/min.	
88W09(NW坑道)	坑道西壁（377.5m）	300cc/min.	ランプロファイア脈より湧出
88W10(NW坑道)	坑道天盤（372.5m）	200cc/min.	
88W11(NW坑道)	坑道天盤（343m）	600cc/min.	
88W12(NW坑道)	坑道西壁（332.2m）	800cc/min.	
88W13(NW坑道)	坑道天盤（298m）	200cc/min.	
88W14(NW坑道)	坑道天盤（274m）	1,000cc/min.	湧出部は褐色を帯びる
88W15(NW坑道)	坑道天盤（247m）	12,000cc/min.	
88W16(NW坑道)	坑道天盤（176.2m）	200cc/min.	湧出部は褐色を帯びる
88W17(NW坑道)	坑道天盤（157m）	40cc/min.	
88W18(NW坑道)	坑道天盤（122.2m）	2,000cc/min.	

表-2　250mレベル坑道における地下水採水位置の概要

測定・採水箇所	割れ目番号	湧水箇所（割れ目調査基点からの距離）	備考
W1（250mL）	-	試錐孔（坑道東壁、-15m）	W１：角度=下向き30°　孔長=301.0m 全て栗橋花崗閃緑岩
W2（250mL）	-	坑道東壁-天盤境界（-5m）	
W3（250mL）	No.58	坑道天盤（48m）	
W4（250mL）	No.62	坑道天盤（50.9m）	
W5（250mL）	No.70	坑道天盤（60.8m）	
W6（250mL）	No.85に交差、低角	坑道西壁（70m）	
W7（250mL）	No.99	坑道西壁-天盤境界（82.1m）	
W8（250mL）	No.99	坑道東壁（82.1m）	
W9（250mL）	No.111に交差、低角	坑道天盤（94.6m）	
W10（250mL）	No.128	坑道天盤（113m）	
W11（250mL）	No.165に交差、低角	坑道天盤（151.4m）	
W12（250mL）	No.181に交差	坑道天盤（163m）	
W13（250mL）	No.188	坑道天盤（168.3m）	
W14（250mL）	No.197	坑道天盤（197m）	
W15（250mL）	No.212	坑道天盤（199.3m）	
W16（250mL）	-	試錐孔（坑道東壁、290m）	角度=0°　孔長=347.1m　全て栗橋花崗閃緑岩
W17（250mL）	-	試錐孔（坑道西壁、290m）	W17：角度=下向き30°　孔長=480.1m 119mまでは栗橋花崗閃緑岩、それ以深では泥岩・砂岩・石灰岩などが分布
W18（250mL）	No.302	坑道天盤（303.6m）	
W19（250mL）	-	坑道天盤（470m）	
W20（550mL）	-	坑道西壁	NW坑道
W21（550mL）	-	坑道天盤	NW坑道

(3) KH-1孔の地下水

KH-1孔の場合，孔内に設置されたパッカーにより区切られた区間の地下水が採水用のテフロンチューブを通じて550mレベルの坑道内に自噴している。採水に際しては，各採水区間からの湧水をテフロンチューブを通じてサンプル瓶に送水し，オーバーフローさせながら気泡が入らないように採取した。

(4) KG-1孔の地下水

KG-1孔の場合，孔内にＭＰ(Multiple Piezometer）システムが設置されている。ＭＰシステムとは，試錐孔内に複数のパッカーをセットし，任意の数の区間設定が行えるようにしたシステムであり必要に応じて専用の孔内プローブ（MOSDAXサンプラープローブモデル2350，Westbay 社製，以下「MOSDAXプローブ」と略す）により，各区間からの地下水を採水できる。MOSDAXプローブによる採水の場合，予め採取しておいた原位置の地下水を用いて採水ボトルを共洗いし，その後，Arガスで置換することによりボトル内への空気の侵入を防いだ。KG-1孔では，MOSDAXプローブによる採水の他にHGP-10（Hydro-Geochemical and Piezometric logger system for 1000m-deep borehole)を用いた採水も実施した。HGP-10は，パッカーで区切られた区間の地下水を採水ポンプおよび導水チューブを使用して地上に連続的に送水することが可能な装置である。HGP-10による採水の場合，空気と接触せずに地上に送水された地下水を，Arガスで置換したグローブバック中でサンプル瓶に採取した。

KG-1孔は地表から掘削された試錐孔であり，掘削時に使用された水はKG-1孔付近の地表水である。そのため元々地下に存在していた地下水は，試錐孔掘削作業等により，その水質に影響を与えられると考えられる。KG-1孔では水質分析用の地下水を採取する前に，このような掘削水等の影響を除くために予備採水と称して，採水区間体積の５倍程度（約 175ℓ）を目安に地下水を採取した。予備採水中に採取した地下水は，主要成分分析およびArガスで置換したグローブバック中での物理化学パラメータの測定を実施した。そして，地下水中のNaおよびCa濃度がほぼ一定の濃度になり，かつpHおよび電気伝導度がほぼ一定の値を示すことを確認した後，各種分析用の地下水を採取した。

２．１．３　物理化学パラメータ測定及び水質・同位体・ガス・微生物分析項目

採水した地表水および地下水に対して，物理化学パラメータの測定及び水質・同位体・ガス・微生物の分析を行った。なおガス・微生物の分析は，KG-1孔の地下水についてのみ実施した。以下に，物理化学パラメータの測定項目および水質・同位体・ガス・微生物の分析項目について記す。

(1) 物理化学パラメータ測定項目

地表水，坑道湧水およびKH-1孔の地下水についての測定項目は，水温，pH，酸化還元電位（Eh）および電気伝導度（EC）の４項目である。KG-1孔の地下水については，溶存酸素濃度（DO）も加えた５項目について測定を実施した。

(2) 水質分析項目

① 地表水，坑道湧水およびKH-1孔の地下水

地表水，坑道湧水およびKH-1孔の地下水については，

Na，K，Mg，Ca，Al，T-Fe，Fe^{2+}，Si

Cl^-，SO_4^{2-}，F^-，TOC(Total Organic Carbon)，IC(Inorganic Carbon)

の分析を行った。但し，地表水や一部の坑道湧水およびKH-1孔の地下水についてはTOC，ICの分析を行っていない試料も含む。なお，地下水中の炭酸濃度に関してはICの分析結果をもとに地下水の水温とpHでの炭酸の存在比率に基づき，計算によりHCO_3^-およびCO_3^{2-}濃度を算出した。またICの分析を行っていない試料のHCO_3^-およびCO_3^{2-}については，滴定法により分析されたHCO_3^-およびCO_3^{2-}濃度の合計を全炭酸濃度とし，地下水の水温とpHでの炭酸の存在比率に基づき計算し直した。

② KG-1孔の地下水

地表水，坑道湧水およびKH-1孔の地下水の分析項目に加えて，

Li，Sr，Mn，I^-，ΣS^{2-}，PO_4^{3-}，NO_3^-，NO_2^-，

NH_4^+，フミン酸，フルボ酸

の分析も実施した。

(3) 同位体分析項目

地表水および地下水の同位体分析項目は，酸素および水素の安定同位体（$\delta^{18}O$およびδD）と水素の放射性同位体である^3H（トリチウム）の3項目である。

(4) ガス分析項目

KG-1孔の地下水に対して行ったガスの分析項目はO_2，N_2，H_2，He，CH_4，CO，CO_2の7項目である。

(5) 微生物分析項目

KG-1孔の地下水に対して行った微生物分析項目は，全菌数計測，各種の生菌（鉄酸化細菌，硫酸塩還元細菌，メタン生成細菌，アンモニア酸化細菌，亜硝酸酸化細菌，硝酸塩還元細菌，脱窒細菌）計測および硫酸塩還元細菌種の同定である。

2．1．4 物理化学パラメータ測定及び水質・同位体・ガス・微生物分析方法

採水した地表水および地下水に対する物理化学パラメータの測定方法および水質・同位体・ガス・微生物の分析方法について，以下に記す。

(1) 物理化学パラメータ測定方法

地表水，坑道湧水（坑道壁面や天盤等からの湧水）およびKH-1孔の地下水については大気開放のもとで200cc 程度をビーカーに採取後，そのまま電極を浸して物理化学パラ

メータの測定を行った。250mレベル坑道の湧水のうち，既存試錐孔であるTK－24孔，6孔およびTK－21孔からの湧水については，電極を試錐孔内に挿入し，地下水が絶えず流れ続けている状態で物理化学パラメータを測定した。表－3に地表水，坑道湧水およびKH-1孔地下水の物理化学パラメータ測定項目に対する測定方法および測定誤差を示す。表－3に示す測定項目および測定誤差は，各測定機器（水温および電気伝導度は電気化学計器㈱製HKP-22型，pHおよび酸化還元電位はセントラル科学㈱製UC-23 型）の取扱説明書に記載されている値である。

KG-1孔の地下水に関しては，MOSDAXプローブによる採水の場合，原位置で採水ボトル内に流入させた地下水を大気に触れさせずに地上に回収し，Arガスで置換したグローブバック中において，採水ボトルから200cc 程度をビーカーに採取後，そのまま電極を浸して物理化学パラメータの測定を行った。HGP-10による採水の場合，原位置での電極による測定および導水チューブを使用して地上に送水された地下水をフローセルのモニタリング装置で約1週間程度モニタリングする方法の2種類の方法で測定した。表－4にMOSDAXプローブによる採水の場合のKG-1孔地下水の物理化学パラメータ測定項目に対する測定方法および測定誤差を示す。表－4に示す測定項目および測定誤差は，各測定機器（水温，pHおよび酸化還元電位は堀場製作所製D-14型，電気伝導度は堀場製作所製BS-14 型）の取扱説明書に記載されている値である。

物理化学パラメータの測定時間は，pHおよび酸化還元電位については電極を浸してから約10分間，水温，電気伝導度および溶存酸素濃度については電極を浸してから約5分間である。

(2) 水質分析方法

① 地表水，坑道湧水およびKH-1孔の地下水

表－3に各分析項目に対する分析方法，定量下限および分析誤差を示す。以下に各元素およびイオン等の分析方法について略述する。

- NaおよびKについては， AAS（原子吸光法）により分析した。
- Mg，Ca，Al，T-Fe，およびSiについては， ICP-AES（誘導結合プラズマ発光分光分析法）により分析した。Siは，試料水を0.45μmのメンブランフィルターで濾過後に分析した。なお，表－5.1 ～5.3 や表－6の分析結果に記されているシリカ（SiO_2）は，ケイ酸濃度を換算したものである。
- Fe^{2+}については，現場で 1,10-フェナントロリン溶液および酢酸アンモニウム溶液を加えた試料水を用いて，波長 510nmにおける吸光度を測定する吸光光度法により分析した。
- Cl^- ，SO_4^{2-} およびF^- については，イオンクロマトグラフ法により分析した。
- TOC およびICについては，TOC およびIC分析装置を用いて赤外吸収法により分析した。

なお各分析項目に対する分析誤差は，坑道湧水を用いて5回繰り返して分析を行い評価した場合の値である。

表－3　地表水，坑道湧水，KH-1孔地下水の水質・同位体分析方法

分析項目	分析方法	定量下限	誤　差
水温	サーミスタ法	－	± 0.1℃
pH	ガラス電極法	－	± 0.01
Eh	Pt電極法	－	± 5mV
EC	交流２電極法	－	測定レンジ３％
Na	AAS *	0.01 ppm	1 %
K	AAS	0.03 ppm	6 %
Mg	ICP-AES **	0.01 ppm	5-8 %
Ca	ICP-AES	0.01 ppm	0.4-2.3 %
Al	ICP-AES	0.1 ppm	1.5-3.5 %
全Fe	ICP-AES	0.01 ppm	2-10%
Fe^{2+}	吸光光度法	0.1 ppm	2-10%
Si	ICP-AES （濾過）	0.1 ppm	1.3-2.8 %
Cl^-	イオンクロマト	0.1 ppm	1-3 %
SO_4^{2-}	イオンクロマト	0.1 ppm	0.7-2.7 %
HCO_3^-	計算値	－	－
CO_3^{2-}	計算値	－	－
F^-	イオンクロマト	0.05 ppm	0.3 %
TOC	赤外吸収法	0.5 ppm	10%
IC	赤外吸収法		10%
δD	質量分析法	－	±1.5 ‰
$\delta^{18}O$	質量分析法	－	±0.16‰
ﾄﾘﾁｳﾑ	液体ｼﾝﾁﾚｰｼｮﾝ法	0.3 TU	±0.2 TU

＊：AAS (Atomic Adsorption Spectroscopy)，原子吸光法

＊＊：ICP-AES (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy)
誘導結合プラズマ発光分光分析法

表-4　KG-1孔地下水の物理化学パラメータ測定・水質・同位体・ガス・微生物分析方法

測定項目	分析方法	定量下限	分析誤差(%)-ガス・水質分析項目に対して-		
			KG-1-2(941118)	KG-1-3(941202)	KG-1-4(950121)
水温	サーミスタ法	-	±0.1℃	±0.1℃	±0.1℃
pH	ガラス電極法	-	±0.01	±0.01	±0.01
Eh	Pt電極法	-	±5mV	±5mV	±5mV
EC	交流2電極法	-	測定レンジの3%	測定レンジの3%	測定レンジの3%
DO	隔膜電極法	-	-	-	-
O2(g)	GC(TCD)*	0.4 (mg/l)	-	-	-
N2(g)	GC(TCD)	0.5 (mg/l)	-	1.1	1.8
H2(g)	GC(TCD)	0.03 (mg/l)	-	4.3	5.2
He(g)	GC(TCD)	0.03 (mg/l)	-	6.6	6.1
CH4(g)	GC(FID)**	0.005 (μg/l)	-	-	-
CO(g)	GC(FID)	0.05 (μg/l)	-	-	-
ΣCO2(g)	赤外吸収法	0.1 (mg/l)	-	2.3	2.4
Si	ICP-AES	0.1 (mg/l)	0.25	0.32	0.81
Na	原子吸光法(AAS)	0.08 (mg/l)	0.62	0.42	0.21
K	原子吸光法(AAS)	0.05 (mg/l)	0.43	0.67	0.66
Li	原子吸光法(AAS)	0.09 (mg/l)	-	-	-
Ca	ICP-AES	0.04 (mg/l)	1.40	0.65	0.24
Mg	ICP-AES	0.08 (mg/l)	1.30	1.00	0.89
Sr	ICP-AES	0.005 (mg/l)	0.71	1.50	0.91
Al	ICP-AES	0.04 (mg/l)	0.61	0.59	0.88
Mn	ICP-AES	0.01 (mg/l)	-	-	-
T-Fe	ICP-AES	0.001 (mg/l)	1.40	1.10	0.87
Fe++	吸光光度法	0.001 (mg/l)	2.10	2.10	-
Cl-	イオンクロマトグラフ法	0.09 (mg/l)	0.22	0.89	0.75
F-	イオンクロマトグラフ法	0.03 (mg/l)	2.50	0.64	1.00
I-	イオンクロマトグラフ法	0.06 (mg/l)	-	-	-
ΣS-	ヨウ素滴定法	0.9 (mg/l)	-	-	-
PO4--(P)	吸光光度法	0.0001 (mg/l)	0.82	0.82	0.54
SO4-	イオンクロマトグラフ法	0.1 (mg/l)	0.40	0.38	0.65
HCO3-	計算値	-	-	-	-
CO3-	計算値	-	-	-	-
NO2-(N)	吸光光度法	0.0001 (mg-N/l)	-	-	-
NO3-(N)	吸光光度法	0.005 (mg-N/l)	-	-	-
NH4+(N)	吸光光度法	0.005 (mg-N/l)	0.76	0.74	0.84
Inorganic Carbon	赤外吸収法	0.14 (mg/l)	2.3	2.3	2.4
Total Organic Carbon	赤外吸収法	0.14 (mg/l)	0.70	0.53	0.82
フミン酸	蛍光光度法	0.5 (mg/l)	-	-	-
フルボ酸	蛍光光度法	1.0 (mg/l)	-	-	-
δD	質量分析法	-	±2‰	±2‰	±2‰
δ18-O	質量分析法	-	±0.2‰	±0.2‰	±0.2‰
3-H	液体シンチレーション法	-	±0.1	±0.1	±0.1
全菌数	AODC法***	-	-	-	-
鉄酸化細菌	MPN(Most Probale Number)法	-	-	-	-
硫酸塩還元細菌	二重皿法	-	-	-	-
	MPN法				
メタン生成細菌	MPN法	-	-	-	-
アンモニア酸化細菌	MPN法	-	-	-	-
亜硝酸酸化細菌	MPN法	-	-	-	-
硝酸還元細菌	MPN法	-	-	-	-
脱窒細菌	MPN法	-	-	-	-

* GC (TCD) : ガスクロマトグラフ法（熱伝導検出器）
** GC (FID) : ガスクロマトグラフ法（水素炎イオン化検出器）
*** AODC法：　アクリジンオレンジ染色法

② KG-1孔の地下水

KG-1孔の地下水は，採水後，採水ボトルに入れたまま氷冷保存（約2℃）して実験室に持ち帰り，各種分析に供した。表－4に各分析項目に対する分析方法，定量下限および分析誤差を示す。以下に各元素およびイオン等の分析方法について略述する。

- Na，KおよびLiについては， AASにより分析した。
- Si，Ca，Mg，Sr，Al，Mn，T-FeについてはICP-AES により分析した。Siは，試料水を0.45μmのメンブランフィルターで濾過後に分析した。
- Fe^{2+}については，Arガスで置換したグローブバック中において 2,2'-ジピリジルおよび酢酸アンモニウム溶液を加えた試料水を用いて，波長 460nmにおける吸光度を測定する吸光光度法により分析した。
- Cl^-，F^-，I^-およびSO_4^{2-}については，イオンクロマトグラフ法により分析した。
- ΣS^{2-}については，Arガスで置換したグローブバック中においてジアミン鉄混合溶液を加えた試料水を用いて，ヨウ素滴定法により分析した。
- PO_4^{3-}については，原理的にはモリブデン青法（溶液中のリン酸イオンが試薬と反応して呈色した時の波長から分析する方法）と同じである混合試薬法による吸光度を測定する吸光光度法で分析した。
- NO_2^-は，スルファニアミドおよびNエチレンジアミンにより発色させる吸光光度法，NO_3^-は，カドミウム還元カラムによる還元法（カドミウムカラムを用いて硝酸窒素を還元させ試料水中の硝酸窒素と亜硝酸窒素の合計量を吸光光度法で求めた後，還元前の試料水中の亜硝酸窒素量を差し引いて求める方法），NH_4^+は，フェノールとの反応により呈色した時の波長から分析するインドフェノール青法による吸光光度法で，各々，分析を実施した。
- TOC およびICについては，TOC およびIC分析装置を用いて赤外吸収法により分析した。
- フミン酸およびフルボ酸の分析に関しては，松田ら（1979）の方法に準拠して行った。具体的には，EDTA溶液およびアンモニア水－塩化アンモニウム緩衝溶液によりpH＝9に調整し，静置した試料水を用いて，蛍光強度を測定する蛍光光度法により分析した。励起波長 320nmにおいて，フミン酸の場合は波長 500nmにおける蛍光光度を，フルボ酸の場合は波長 420nmにおける蛍光光度を分析した。

なお各分析項目に対する分析誤差は，各分析試料水を用いて10回繰り返して分析を行い評価した場合の値である。

(3) 同位体分析方法

表－3に地表水，坑道湧水およびKH-1孔の地下水に対して，表－4にKG-1孔の地下水に対しての$\delta^{18}O$，δDおよび ^3Hの分析方法，検出限界および分析誤差を示す。以下に同位体分析方法について略述する。

酸素および水素の安定同位体比の分析にあたっては，$\delta^{18}O$では試料水をCO_2ガスに，δDでは試料水をH_2ガスにして，質量分析計を用いて行った。試料水の$\delta^{18}O$およびδDの値は，試料水の同位体比と標準試料の同位体比とを比較した時の差として，‰で表される。なお標準試料としては，標準平均海水（SMOW）が用いられる。以下に$\delta^{18}O$およびδDの計算式を示す。

$$\delta^{18}O = \left\{ \frac{(^{18}O/^{16}O)\ \text{試料}}{(^{18}O/^{16}O)\ \text{SMOW}} - 1 \right\} \times 1000\ (‰)$$

$$\delta D = \left\{ \frac{(D/H)\ \text{試料}}{(D/H)\ \text{SMOW}} - 1 \right\} \times 1000\ (‰)$$

水素の放射性同位体である^3Hの分析にあたっては，試料水を数ml程度まで電解濃縮した後，液体シンチレーションカウンターを用いて分析した。

(4) ガス分析方法

表－4に各分析項目に対する分析方法，検出限界および分析誤差を示す。ガス分析に供した地下水も，採水後，採水ボトルに入れたまま氷冷保存（約2℃）して実験室に持ち帰ったものである。以下にガス分析方法について略述する。

- O_2，N_2，H_2，Heについては，検出器にTCD（熱伝導検出器）を備えたガスクロマトグラフィーを用いて分析した。
- CH_4については，検出器にFID（水素炎イオン化検出器）を備えたガスクロマトグラフィーを用いて分析した。
- COについては検出器にFIDを備えたガスクロマトグラフィーを用いて分析した。分析にあたってはCOを直接検出するのではなく，COをH_2と触媒によりCH_4に還元し，生成したCH_4をFIDで検出する方法で行った。
- CO_2については，IC分析装置を用いて赤外吸収法により分析した。

(5) 微生物分析方法

表－4に各分析項目に対する分析方法を示す。微生物分析に供した地下水は，予めオートクレーブで滅菌し，Arガスで置換した採水ボトルを用いて採水され，採水後，採水ボトルに入れたまま氷冷保存（約2℃）して実験室に持ち帰ったものである。以下に微生物分析方法について略述する。

・全菌数計測は，AODC法（アクリジンオレンジ染色法）に準拠して行った。なお本計測で計数された全菌は，生菌，死菌に係わらず顕微鏡下で微生物細胞と認識された全てのものである。
・各種の生菌の分析については，MPN （Most Probale Number）法に準拠して培養計数する方法で行った。鉄酸化細菌の計数は，Thiobacillus ferrooxidans について行った。硫酸塩還元細菌については，MPN 法の他に二重皿法による培養計数も実施した。
・硫酸塩還元細菌種は，形態学的試験（光学顕微鏡や走査型顕微鏡による観察等）により，菌体の形状，胞子形成能の有無，鞭毛の種類，運動性の有無等を調査することにより同定した。

2．1．5　物理化学パラメータ測定及び水質・同位体・ガス・微生物分析結果

表－5.1 ～5.3 に地表水，坑道湧水，KH-1孔およびKG-1孔の地下水の物理化学パラメータ測定結果，水質および同位体分析結果を示す。KG-1孔の地下水については，表－6にガスおよび微生物の分析結果も併せて示してある。なお，物理化学パラメータ測定結果のうち酸化還元電位（Eh）の値は，地下水の水温と電極（参照電極はAg・AgCl電極）の指示値（ORP）をもとに以下の式を用いて算出した。なお下式は，日本工業標準調査会のイオン電極法通則（1981）及び使用した電極の取扱説明書を参考に地下水温（約10～15℃）付近での単位温度当たりの電位の変化率（-0.6mV／℃）を求めて算出したものである。

Eh（mV）＝-0.6×水温＋223 ＋ ORP（mV）

また電気伝導度の値は，全て25℃での値に換算したものである。換算には以下の式を用いた。なお下式は，半谷ほか（1960）による温度補正値（0.022）を用いたものである。

EC（μS/cm）＝EC* ＋ {EC* ×0.022 ×（25－水温）}

ここで，EC：25℃での換算値，EC* ：測定時の水温での値である。

以下に水質・ガス・微生物分析結果についてまとめる。

(1) 水質分析結果（分析値の信頼性に関して）

表－5.1 ～5.3 に示した水質分析結果に対して，陽イオンと陰イオンの当量関係から，陽イオン（Na^+，K^+，Ca^{2+}およびMg^{2+}）と陰イオン（Cl^-，SO_4^{2-} およびHCO_3^-）のバランスをチェックした。イオンバランスのチェックの結果を図－7に示す。地表水および地下水のΣ陰イオン（Cl^-，SO_4^{2-} およびHCO_3^- の当量数の和）は，いずれの試料も3.0meq/lより小さかった。なおイオンバランスは，那須ほか（1994）を参考に以下の関係をもとにチェックした。

Σ陰イオン＝0～3.0meq/lのとき　⇨　Σ陽イオン－Σ陰イオン≦±0.2meq/l

図－7よりHCO_3^- 濃度が20ppm 付近の試料水では，Σ陰イオン＞0.2meq/lのものが存在し他の試料水と比べると，やや分析値の信頼性が劣ると思われる。しかし大部分の試料水は上述の関係式の範囲内にあり，分析値の信頼性は高いと言える。

(2) KG-1孔の地下水中のガス成分

KG-1-3（標高約37～43m)およびKG-1-4（標高約-7～-1m)の地下水中に溶存する主なガスは，N_2 とCO_2 であった。いずれの地下水も，溶存酸素濃度は定量下限値以下（＜0.4 mg/l）であった。

(3) KG-1孔の地下水中の微生物

KG-1-2（標高約289 ～ 295m)およびKG-1-3（標高約37～43m)の地下水中に確認された微生物の種類・量を以下に記す。

表-5.1 地表水・地下水の物理化学パラメータ測定・水質および同位体分析結果（その1）

Sample	Location	Altitude (m)	Date	Sampling method	Laboratory	Temp (℃)	pH	ORP (mV)	Eh (mV)	EC (μS/cm)	Na+ (ppm)	K+ (ppm)	Mg++ (ppm)	Ca++ (ppm)	Al+++ (ppm)	T.Fe (ppm)	Fe++ (ppm)	SiO2 (ppm)	Si++++ (ppm)	Cl- (ppm)	SO4-- (ppm)	HCO3- (ppm)	CO3-- (ppm)	F- (ppm)	TOC (ppm)	IC (ppm)	TC (ppm)	δ D (‰)	δ 18-O (‰)	3-H (T.U.)	Dissolved solid (mg/l)
S-1	surface	815	901120	Normal	Nitetsu	9.0	6.1	252	470	18.0	2.50	0.60	0.40	1.80	-	-	-	10.50	-	1.70	-	11.60	0.00	-	-	-	-	-63.2	-8.9	7.6±0.2	-
S-2	surface	650	901120	Normal	Nitetsu	8.5	5.8	214	432	20.5	2.70	0.50	0.30	2.70	-	-	-	9.40	-	2.80	1.90	10.40	0.00	-	-	-	-	-66.5	-9.5	7.5±0.2	30.80
S-3	surface	588	901120	Normal	Nitetsu	9.3	5.3	218	436	22.5	2.70	0.70	0.40	2.30	-	-	-	10.00	-	3.10	2.00	10.40	0.00	-	-	-	-	-59.6	-8.4	7.6±0.2	31.60
S-4	surface	800	901120	Normal	Nitetsu	9.5	5.3	260	477	25.1	2.80	0.70	0.70	3.30	-	-	-	12.90	-	2.50	1.70	15.20	0.00	-	-	-	-	-	-	-	39.80
Aomori	surface	785	920831	Normal	Nitetsu	-	7.4	-	-	33.0	3.10	0.90	0.50	2.90	-	-	-	14.80	-	2.40	0.20	21.00	0.00	-	-	-	-	-61.9	-10.2	7.0±0.1	45.80
BBW01	550m NWdrift	575	881212	Normal	Nitetsu	12.3	8.2	261	476	77.3	6.20	0.80	0.10	10.30	-	-	-	11.60	-	2.70	6.90	32.50	0.30	-	-	-	-	-67.1	-10.7	11.6±0.2	70.90
BBW02	550m NWdrift	575	881212	Normal	Nitetsu	12.1	8.2	266	481	78.9	7.00	0.90	0.00	9.50	-	-	-	11.60	-	2.50	5.80	28.70	0.20	-	-	-	-	-	-	-	66.00
BBW03	550m NWdrift	575	881212	Normal	Nitetsu	11.9	8.5	275	491	81.0	6.20	0.70	0.10	11.00	-	-	-	11.30	-	2.30	6.00	34.90	0.60	-	-	-	-	-74.8	-10.5	10.7±0.2	72.50
BBW04	550m NWdrift	575	881212	Normal	Nitetsu	12.2	8.4	284	509	77.2	5.90	0.60	0.10	12.10	-	-	-	11.70	-	2.80	6.30	39.10	0.40	-	-	-	-	-	-	-	78.40
BBW05	550m NWdrift	575	881212	Normal	Nitetsu	11.9	7.7	280	476	73.7	6.90	0.70	0.00	9.20	-	-	-	11.40	-	2.00	6.00	33.90	0.00	-	-	-	-	-65.8	-10.6	10.2±0.2	70.10
BBW06	550m NWdrift	575	881212	Normal	Nitetsu	12.0	7.4	286	482	77.2	6.90	0.80	0.00	7.90	-	-	-	11.10	-	2.20	5.70	34.50	0.00	-	-	-	-	-72	-10.7	10.4±0.2	70.90
BBW07	550m NWdrift	575	881212	Normal	Nitetsu	12.2	9.3	180	395	78.2	8.40	0.70	0.00	7.90	-	-	-	10.80	-	2.10	6.70	24.50	2.20	-	-	-	-	-68.2	-10.5	8.6±0.2	61.10
BBW08	550m NWdrift	575	881215	Normal	Nitetsu	12.1	7.7	257	472	81.3	11.10	0.60	0.00	7.60	-	-	-	12.20	-	1.90	5.40	40.10	0.00	-	-	-	-	-64	-10.4	9.2±0.2	78.60
BBW09	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	11.9	9.0	208	422	65.8	10.40	0.50	0.00	4.50	-	-	-	11.40	-	1.90	4.20	26.20	1.10	-	-	-	-	-63.7	-10.6	7.9±0.2	58.80
BBW10	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	11.9	8.9	230	446	64.0	9.20	0.50	0.00	5.20	-	-	-	12.10	-	1.50	5.50	32.10	1.10	-	-	-	-	-	-	-	66.10
BBW11	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	11.8	9.2	245	461	64.7	8.80	0.50	0.00	5.50	-	-	-	11.80	-	1.90	5.30	31.20	1.10	-	-	-	-	-	-	-	64.70
BBW12	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	11.5	8.4	243	459	69.9	9.90	0.40	0.00	3.50	-	-	-	10.90	-	1.50	5.30	31.20	0.30	-	-	-	-	-	-	-	64.70
BBW13	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	11.5	8.0	261	477	61.2	4.50	0.60	0.30	8.30	-	-	-	14.00	-	1.50	5.30	27.50	0.10	-	-	-	-	-66.9	-10.4	8.0±0.2	62.00
BBW14	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	11.3	8.5	261	477	63.1	6.50	0.50	0.00	7.20	-	-	-	13.00	-	1.80	5.00	26.30	0.40	-	-	-	-	-62.9	-10.7	10.1±0.2	62.10
BBW15	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	10.8	8.4	255	471	72.3	4.80	0.60	0.20	10.30	-	-	-	14.10	-	2.00	5.80	32.80	0.30	-	-	-	-	-72.3	-10.7	8.1±0.2	70.40
BBW16	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	10.5	8.0	277	494	79.8	5.90	0.70	0.10	10.50	-	-	-	13.00	-	2.00	6.50	34.10	0.10	-	-	-	-	-66.2	-10.2	13.9±0.2	72.80
BBW17	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	11.0	8.3	274	490	81.0	5.50	0.90	0.20	10.80	-	-	-	13.00	-	2.20	6.10	40.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	78.70
BBW18	550m NWdrift	575	881213	Normal	Nitetsu	10.9	8.8	268	484	78.7	6.00	0.90	0.30	9.20	-	-	-	12.60	-	2.40	6.20	32.40	0.90	-	-	-	-	-64.9	-10.3	13.0±0.2	70.00
KD-09 891021	550m KD-09	575	891021	Normal	Nitetsu	11.6	7.7	164	370	78.2	11.10	0.70	0.10	5.00	-	-	-	11.50	-	2.00	7.90	32.20	0.10	-	-	-	-	-	-	-	70.50
KD-09 891130	550m KD-09	575	891130	Normal	Nitetsu	11.7	8.5	175	391	80.8	9.40	0.60	0.00	8.30	-	-	-	10.60	-	1.80	8.90	30.50	0.40	-	-	-	-	-62.7	-10.6	8.3±0.2	68.10
KD-09 891110	550m KD-09	575	891110	Normal	Nitetsu	11.6	8.6	184	400	92.4	9.00	1.70	0.10	8.60	-	-	-	11.90	-	1.80	8.50	32.40	0.60	-	-	-	-	-61.4	-10.4	8.9±0.2	72.00
KD-09 891229	550m KD-09	575	891229	Normal	Nitetsu	11.6	8.7	192	408	90.6	8.90	1.00	0.20	8.90	-	-	-	11.00	-	1.80	11.30	26.70	0.60	-	-	-	-	-60.8	-10.4	9.5±0.2	69.70
																														0.00
KH-1-1 900425	2.01-101.17	524	900425	Packer	Nitetsu	12.4	9.3	-145	70	76.2	10.50	0.60	0.00	4.10	-	-	-	10.50	-	2.40	6.40	28.10	2.50	-	-	-	-	-69.7	-10.6	8.6±0.1	62.80
KH-1-1 901025	2.01-101.17	524	901025	Packer	Nitetsu	12.2	8.5	-12	203	81.6	10.10	0.60	0.00	4.10	-	-	-	10.90	-	2.10	7.70	27.40	0.50	-	-	-	-	-67.1	-9.9	4.3±0.1	62.90
KH-1-1 910129	2.01-101.17	524	910129	Packer	Nitetsu	11.3	8.6	69	264	74.4	11.10	0.50	0.00	4.00	-	-	-	11.10	-	2.40	9.30	22.00	0.40	-	-	-	-	-	-	-	60.40
KH-1-1 910725	2.01-101.17	524	910725	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	12.30	0.50	0.00	3.80	-	-	-	11.00	-	3.00	7.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KH-1-1 920817	2.01-101.17	524	920817	Packer	Nitetsu	13.0	8.6	107	322	82.9	11.20	0.60	0.00	4.40	-	-	-	10.80	-	2.10	7.30	23.00	0.50	-	-	-	-	-	-	-	59.40
KH-1-1 940208	2.01-101.17	524	940208	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	11.90	0.60	0.00	4.40	<0.1	0.1	-	10.70	-	2.20	8.00	-	-	0.10	0.60	4.30	-	-	-	-	-
KH-1-2 900425	102.25-236.41	406	900425	Packer	Nitetsu	12.3	10.1	-137	78	112.6	16.70	0.40	0.00	2.80	-	-	-	16.00	-	2.60	11.90	21.70	11.80	-	-	-	-	-76.8	-11.5	0.7±0.08	72.10
KH-1-2 901025	102.25-236.41	406	901025	Packer	Nitetsu	12.1	9.1	-15	200	96.9	15.70	0.30	0.00	2.80	-	-	-	16.00	-	2.20	11.60	33.20	1.70	-	-	-	-	-76.5	-10.9	0.4±0.08	80.80
KH-1-2 910129	102.25-236.41	406	910129	Packer	Nitetsu	11.9	9.1	7	223	96.7	16.60	0.30	0.00	2.80	-	-	-	16.10	-	2.60	11.70	26.30	1.30	-	-	-	-	-	-	-	75.40
KH-1-2 910725	102.25-236.41	406	910725	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	16.50	0.30	0.00	2.50	-	-	-	16.40	-	3.00	9.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KH-1-2 920817	102.25-236.41	406	920817	Packer	Nitetsu	13.6	8.9	-33	181	96.7	15.30	0.30	0.00	3.00	-	-	-	16.40	-	3.20	10.60	24.60	0.60	-	-	-	-	-	-	-	72.40
KH-1-2 940208	102.25-236.41	406	940208	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	16.80	0.30	0.00	3.10	<0.1	0	-	16.10	-	2.50	9.40	-	-	0.20	0.50	3.50	4.00	-	-	-	-
KH-1-3 900425	237.49-337.14	288	900425	Packer	Nitetsu	12.4	10.2	-139	76	111.6	17.00	0.40	0.00	2.70	-	-	-	14.30	-	2.60	12.50	20.10	12.60	-	-	-	-	-78.6	-11.6	0.6±0.09	69.50
KH-1-3 901025	237.49-337.14	288	901025	Packer	Nitetsu	12.2	8.9	25	240	94.8	15.80	0.30	0.00	2.70	-	-	-	15.20	-	2.70	10.20	33.30	1.10	-	-	-	-	-77.5	-10.9	<0.3	79.70
KH-1-3 910129	237.49-337.14	288	910129	Packer	Nitetsu	12.0	9.1	-18	188	95.4	15.60	0.30	0.00	2.80	-	-	-	16.00	-	2.80	12.00	24.00	1.20	-	-	-	-	-	-	-	73.30
KH-1-3 910725	237.49-337.14	288	910725	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	16.80	0.40	0.00	2.60	-	-	-	16.20	-	3.00	9.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KH-1-3 920817	237.49-337.14	288	920817	Packer	Nitetsu	13.3	8.6	-63	132	96.9	12.70	0.40	0.00	3.40	-	-	-	16.30	-	3.20	11.20	19.10	0.40	-	-	-	-	-	-	-	66.30
KH-1-3 940208	237.49-337.14	288	940208	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	16.60	0.40	0.00	2.70	<0.1	0	-	14.60	-	2.40	9.70	-	-	0.20	0.50	3.70	4.20	-	-	-	-
KH-1-4 900425	338.22-410.94	201	900425	Packer	Nitetsu	12.6	9.3	-197	18	111.1	18.70	0.60	0.00	2.40	-	-	-	10.60	-	2.40	13.00	36.60	3.20	-	-	-	-	-75.3	-11.6	1.8±0.1	83.30
KH-1-4 901025	338.22-410.94	201	901025	Packer	Nitetsu	12.3	8.8	-8	207	105.0	17.80	0.60	0.00	2.70	-	-	-	18.50	-	2.20	12.80	34.50	0.90	-	-	-	-	-76.6	-11.5	0.6±0.09	89.10
KH-1-4 910129	338.22-410.94	201	910129	Packer	Nitetsu	12.2	9.1	-67	158	95.2	18.90	0.50	0.00	2.80	-	-	-	18.70	-	2.60	14.20	26.60	1.40	-	-	-	-	-	-	-	84.30
KH-1-4 910725	338.22-410.94	201	910725	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	18.90	0.60	0.00	2.60	-	-	-	18.90	-	3.90	11.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KH-1-4 920817	338.22-410.94	201	920817	Packer	Nitetsu	13.2	8.8	-99	118	107.1	18.60	0.60	0.00	3.20	-	-	-	19.00	-	3.10	13.00	25.90	0.70	-	-	-	-	-	-	-	80.40
KH-1-4 940208	338.22-410.94	201	940208	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	19.30	0.60	0.00	2.60	<0.1	0	-	18.60	-	2.50	12.10	-	-	0.30	0.50	4.40	4.90	-	-	-	-
KH-1-5 900425	412.02-500.00	119	900425	Packer	Nitetsu	12.7	9.7	-181	64	143.9	24.50	0.80	0.00	5.70	-	-	-	26.80	-	3.00	38.50	26.10	6.40	-	-	-	-	-78.5	-11.7	<0.3	134.40
KH-1-5 901025	412.02-500.00	119	901025	Packer	Nitetsu	12.3	9.2	-31	184	134.0	20.30	0.70	0.00	4.50	-	-	-	26.30	-	1.90	28.80	29.50	2.00	-	-	-	-	-80.1	-11.7	<0.3	108.00
KH-1-5 910129	412.02-500.00	119	910126	Packer	Nitetsu	12.0	9.3	-88	118	128.3	21.00	0.50	0.00	4.70	-	-	-	26.50	-	2.10	25.00	26.20	2.50	-	-	-	-	-	-	-	108.00
KH-1-5 910725	412.02-500.00	119	910725	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	20.80	0.50	0.00	4.40	-	-	-	26.60	-	1.70	21.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KH-1-5 920817	412.02-500.00	119	920817	Packer	Nitetsu	13.1	9.0	-141	74	135.1	20.40	0.50	0.00	5.30	-	-	-	26.90	-	1.80	25.70	27.40	1.00	-	-	-	-	-	-	-	108.00
KH-1-5 940208	412.02-500.00	119	940208	Packer	Nitetsu	-	-	-	-	-	21.30	0.50	0.00	3.90	<0.1	0	-	25.40	-	2.20	21.40	-	-	0.40	0.60	3.30	3.80	-	-	-	-
KO-1-1 921221	GL-222~GL-226	580	921221	MP55 (HGP-10)	Nitetsu	11.0	9.4	261	477	129.4	11.40	1.10	0.20	5.00	<0.1	0.1	0.00	12.80	-	1.80	8.40	31.00	2.00	-	-	-	-	-61.1	-10.1	10.6±0.2	71.70
KO-1-2 921211	GL-489~GL-495	293	921211	MP55 (HGP-10)	Nitetsu	14.4	9.8	-390	-178	122.0	9.40	1.10	0.20	3.50	<0.1	0.3	0.00	12.40	-	2.30	8.80	23.00	4.00	-	-	-	-	-64.8	-10.6	8.3±0.1	67.50
KO-1-2 941118	GL-489~GL-495	293	941118	MP55 (MOSDAX)	DOWA	13.2	10.0	127	342	81.0	11.00	0.60	0.00	6.30	0.3	0	0.00	16.30	7.60	1.90	8.90	28.40	6.90	0.20	0.40	7.00	7.40	-73	-11.1	2.6±0.1	73.40
KO-1-3 921126	GL-740~GL-747	41	921126	MP55 (HGP-10)	Nitetsu	17.7	10.1	-241	-30	105.6	13.70	1.20	0.10	3.70	<0.1	0	0.00	21.00	-	2.30	12.30	21.00	7.00	-	-	-	-	-62.1	-10.6	4.5±0.1	76.30
KO-1-3 941202	GL-740~GL-747	41	941202	MP55 (MOSDAX)	DOWA	10.9	9.3	129	345	106.0	17.30	0.60	0.10	7.20	0.2	0	0.00	9.70	4.50	2.90	17.10	31.90	2.40	0.40	0.20	6.70	7.00	-73.1	-10.6	3.4±0.1	86.70
KO-1-4 950121	GL-785~GL-791	-4	950121	MP55 (MOSDAX)	DOWA	11.1	9.0	142	358	118.0	14.70	0.80	0.30	6.80	0.1	0	-	18.65	3.10	3.50	8.60	45.70	1.60	0.00	0.80	9.30	10.10	-67.5	-10.1	4.7±0.1	87.10
WI-9 (TK24)	250m drift	258	930901	Normal	PNC TONO	14.1	9.5	-203	11	81.8	8.70	0.20	<0.01	8.10	<0.1	<0.02	-	16.10	7.50	2.00	7.30	15.40	1.81	0.10	1.00	3.40	4.40	-	-	-	-
WI-10 (TK24)	250m drift	258	931018	Normal	Nitetsu	14.7	9.9	19	223	78.0	4.90	0.20	0.00	8.50	<0.1	<0.01	<0.01	14.50	6.80	1.80	12.70	11.40	2.80	<0.05	0.70	2.80	3.50	-99.6	-11.1	4.6±0.1	84.00
WI-12 (TK24)	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.8	9.6	33	248	77.0	5.60	0.20	0.00	7.60	<0.1	<0.02	-	15.60	7.30	2.20	13.50	10.64	1.52	0.10	1.50	2.40	3.90	-	-	-	44.70
WI-12 (TK24)	250m drift	258	931218	Normal	Nitetsu	15.3	9.5	10	223	78.4	5.70	0.20	0.00	8.40	<0.1	0	<0.01	16.30	7.60	2.00	12.90	14.50	1.70	<0.05	0.50	3.20	3.70	-97.5	-10.8	6.6±0.4	80.00
WI-1 (TK24)	250m drift	258	940106	Normal	Nitetsu	14.7	9.4	-63	131	78.6	5.80	0.20	0.00	8.70	<0.1	0	<0.01	16.90	7.90	1.00	12.80	9.80	0.90	<0.05	0.70	2.10	2.80	-99.7	-11	5.2±0.3	86.20
WI-1 (TK24)	250m drift	258	9401X	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	6.20	0.10	0.00	8.30	<0.1	<0.02	-	15.20	7.10	1.20	13.70	-	-	0.10	0.70	2.60	3.30	-	-	-	-
WI-2 (TK24)	250m drift	258	940208	Normal	Nitetsu	15.4	9.6	-113	100	78.1	5.30	0.20	0.00	8.70	<0.1	0	<0.01	16.90	7.90	2.40	12.70	10.20	1.50	0.10	0.80	2.30	3.10	-99.5	-10.5	5.8±0.3	86.40
WI-3 (TK24)	250m drift	258	940309	Normal	Nitetsu	15.0	9.5	-210	3	78.2	5.80	0.20	0.00	8.50	<0.1	<0.01	<0.01	16.70	7.80	2.10	12.70	10.90	1.30	0.10	0.80	2.40	3.00	-98.6	-10.6	5.2±0.3	86.90
WI-4 (TK24)	250m drift	258	940413	Normal	Nitetsu	15.0	9.6	-190	23	78.1	5.80	0.20	0.00	8.30	0.1	<0.01	<0.01	15.40	7.20	2.00	12.80	10.20	1.50	0.10	0.80	2.30	3.10	-78	-10.7	4.9±0.1	84.70
94-WI-10 (TK24)	250m drift	258	941013	Normal	Nitetsu	14.9	9.6	-313	-100	79.1	5.20	0.20	0.00	7.20	<0.1	<0.3	<0.05	16.50	7.70	1.80	11.80	18.70	2.70	0.30	1.00	4.20	5.20	-96.2	-10.5	5.3±0.1	81.40
94-WI-11 (TK24)	250m drift	258	941116	Normal	Nitetsu	15.0	9.6	-255	-42	79.3	5.10	0.20	<0.02	8.30	<0.1	0.4	<0.05	16.50	7.70	1.80	11.60	19.30	2.80	0.20	0.90	4.40	5.30	-99.5	-10.9	5.3±0.1	-
94-WI-12 (TK24)	250m drift	258	941215	Normal	Nitetsu	15.4	9.6	-173	40	77.9	5.30	0.20	<0.02	8.20	<0.1	<0.3	<0.05	14.80	6.80	1.60	11.80	21.50	3.10	0.30	0.60	4.90	5.40	-98.5	-10.7	5.4±0.1	-
95-WI-1 (TK24)	250m drift	258	950111	Normal	Nitetsu	15.2	9.6	-149	64	70.4	4.90	0.30	<0.02	5.90	<0.1	<0.3	<0.05	15.50	7.20	2.00	12.80	12.30	1.80	<0.1	0.40	2.80	3.20	-99.7	-10.6	4.9±0.1	-
95-WI-2 (TK24)	250m drift	258	950214	Normal	Nitetsu	15.4	9.5	-108	107	75.6	5.50	0.20	<0.02	8.40	<0.1	<0.3	<0.05	16.00	7.50	2.00	13.30	26.20	3.10	0.30	0.40	5.60	6.20	-70.2	-10.9	4.5±0.1	-
95-WI-3 (TK24)	250m drift	258	950315	Normal	Nitetsu	15.4	9.6	-33	180	78.2	5.30	0.20	<0.02	8.20	<0.1	<0.3	<0.05	15.10	7.10	2.10	13.40	23.10	3.30	<0.1	0.40	5.20	5.60	-70.1	-10.9	5.2±0.1	-
W2-9	250m drift	258	930901	Normal	PNC TONO	15.0	8.7	109	322	77.2	10.40	0.30	0.00	5.00	<0.1	<0.02	-	12.70	5.90	1.80	4.90	26.50	0.50	0.10	0.70	5.70	6.40	-	-	-	63.60

表-5.2　地表水・地下水の物理化学パラメータ測定・水質および同位体分析結果（その2）

Sample	Location	Altitude (m)	Date	Sampling method	Laboratory	Temp (℃)	pH	ORP (mV)	Eh (mV)	EC (μS/cm)	Na+ (ppm)	K+ (ppm)	Mg+ (ppm)	Ca+ (ppm)	Al+++ (ppm)	T.Fe (ppm)	Fe++ (ppm)	SiO2 (ppm)	Si++++ (ppm)	Cl- (ppm)	SO4-- (ppm)	HCO3- (ppm)	CO3-- (ppm)	F- (ppm)	TOC (ppm)	IC (ppm)	TC (ppm)	δ D (‰)	δ 18-O (‰)	3-H (T.U.)	Dissolved solid (mg/l)
W3-9	250m drift	258	930901	Normal	PNC TONO	14.2	9.0	87	3273	79.2	9.50	0.20	<0.01	0.00	<0.1	<0.02	-	11.90	5.60	1.70	4.00	27.50	1.00	0.40	1.00	5.60	6.60	-	-	-	60.61
W3-10	250m drift	258	931018	Normal	Nittetsu	15.2	9.7	128	341	78.9	9.90	0.20	0.00	0.20	<0.1	<0.01	<0.01	10.50	4.90	1.70	9.00	16.80	3.50	<0.05	1.50	4.40	5.90	-70.6	-10.8	10.0±0.2	56.30
W3-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.3	9.1	151	364	78.1	8.40	0.30	<0.01	5.70	<0.1	<0.02	-	11.80	5.50	2.00	9.60			0.10	1.30	2.40	3.70	-	-	-	57.81
W3-12	250m drift	258	931215	Normal	Nittetsu	15.2	9.2	148	359	78.7	9.10	0.20	0.00	5.80	<0.1	<0.01	<0.01	12.40	5.80	1.80	9.00	23.50	1.30	<0.05	0.80	4.90	5.50	-64.9	-11	11.0±0.4	61.80
W3-1	250m drift	258	940105	Normal	Nittetsu	14.8	9.2	156	369	78.9	9.30	0.20	0.00	6.10	<0.1	<0.01	<0.01	12.60	6.00	1.70	8.60	20.10	1.20	<0.05	0.50	4.20	4.70	-70.9	-10.9	11.5±0.4	59.80
W3-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	9.70	0.30	0.10	6.30	<0.1	<0.02	-	12.10	5.60	2.00	9.40	-	-	0.10	0.40	4.00	4.40	-	-	-	-
W3-2	250m drift	258	940208	Normal	Nittetsu	15.6	9.2	161	374	78.3	9.70	0.20	0.00	6.20	<0.1	<0.01	<0.01	12.60	5.90	1.90	8.60	22.10	1.30	0.10	1.00	4.60	5.60	-67.6	-10.8	10.6±0.4	61.30
W3-3	250m drift	258	940309	Normal	Nittetsu	15.1	9.2	85	298	77.8	9.40	0.20	0.00	6.00	<0.1	<0.01	<0.01	12.40	5.80	1.90	9.30	24.00	1.40	0.10	0.60	5.00	5.60	-66	-10.7	11.9±0.4	63.20
W3-4	250m drift	258	940413	Normal	Nittetsu	15.2	9.4	76	289	78.3	9.50	0.20	0.00	5.80	0.1	<0.01	<0.01	11.30	5.30	1.90	9.40	20.90	1.90	0.10	0.90	4.50	5.40	-68.2	-10.6	9.6±0.2	59.00
94-W3-10	250m drift	258	941013	Normal	Nittetsu	14.9	9.3	80	293	79.3	8.90	0.40	<0.02	5.30	<0.1	<0.3	<0.05	12.50	5.80	1.50	8.60	27.10	2.00	0.30	1.00	5.70	6.80	-64.8	-10.4	9.8±0.2	64.32
94-W3-11	250m drift	258	941116	Normal	Nittetsu	15.0	9.2	59	272	78.7	8.20	0.30	<0.02	6.10	<0.1	<0.3	<0.05	12.50	5.80	1.50	8.60	21.80	1.30	0.10	0.80	4.80	5.30	-68.4	-10.7	11.1±0.2	59.02
94-W3-12	250m drift	258	941215	Normal	Nittetsu	15.2	9.1	139	352	77.4	8.10	0.30	<0.02	6.00	<0.1	<0.3	<0.05	11.50	5.40	1.40	8.30	23.40	1.10	0.30	0.80	4.80	5.70	-68.8	-10.9	10.5±0.2	59.02
95-W3-1	250m drift	258	950111	Normal	Nittetsu	15.0	9.4	136	349	75.9	7.90	0.30	<0.02	5.90	<0.1	<0.3	<0.05	11.80	5.50	1.70	9.00	18.30	1.50	0.30	1.70	3.50	5.20	-68.4	-10.6	9.4±0.1	52.92
95-W3-2	250m drift	258	950214	Normal	Nittetsu	15.4	9.3	128	341	76.2	8.30	0.20	<0.02	6.20	<0.1	<0.3	<0.05	11.20	5.20	1.70	9.10	30.20	2.20	0.30	0.50	5.40	5.90	-68.6	-10.7	10.1±0.1	66.92
95-W3-3	250m drift	258	950315	Normal	Nittetsu	15.5	9.2	155	368	77.9	8.50	0.20	<0.02	6.00	<0.1	<0.3	0.40	11.40	5.30	1.90	9.90	30.10	1.70	0.40	0.50	6.30	6.70	-69.8	-10.8	10.5±0.2	68.02
95-W3-4	250m drift	258	950412	Normal	PNC TONO	16.1	9.5	119	332	78.4	9.50	0.30	<0.01	6.20	<0.1	<0.02	-	12.21	5.70	2.30	10.00	18.14	2.13	0.10	5.20	4.00	9.20	-	-	-	58.37
95-W3-5	250m drift	258	950517	Normal	PNC TONO	15.3	9.4	151	364	78.8	9.40	0.20	<0.31	6.10	<0.1	<0.02	-	12.00	5.60	1.90	9.30	21.36	1.98	0.10	2.70	4.60	7.10	-	-	-	60.17
W4-9	250m drift	258	930901	Normal	PNC TONO	14.2	8.2	136	350	75.9	9.40	0.20	<0.01	6.30	<0.1	<0.02	-	11.90	5.50	1.80	4.40	26.30	0.40	0.10	1.30	5.30	6.60	-	-	-	60.31
W4-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	9.40	0.30	0.00	6.70	<0.1	<0.02	-	11.50	5.40	1.90	9.50	-	-	0.10	0.60	5.20	5.80	-	-	-	-
W5-9	250m drift	258	930901	Normal	PNC TONO	14.1	8.6	118	332	76.2	9.90	0.20	<0.01	6.20	<0.1	<0.02	-	12.70	5.90	1.80	4.60	26.70	0.40	0.10	1.20	5.40	6.60	-	-	-	62.11
W5-10	250m drift	258	931018	Normal	Nittetsu	15.0	9.7	125	338	78.1	7.90	0.20	0.00	6.30	<0.1	<0.01	<0.01	11.10	5.20	1.70	8.90	19.30	3.50	<0.05	0.70	4.50	5.20	-67.8	-10.8	9.6±0.2	55.40
W5-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.6	8.7	187	400	73.2	8.80	0.30	<0.01	6.10	<0.1	<0.02	-	11.80	5.40	1.90	9.30	20.90	0.40	0.10	1.20	4.20	5.50	-	-	-	58.91
W5-12	250m drift	258	931215	Normal	Nittetsu	15.2	8.4	177	390	77.6	8.60	0.20	0.00	6.60	<0.1	0	<0.01	12.40	5.80	1.80	8.70	27.00	0.40	<0.05	0.50	5.40	5.90	-65.4	-10.9	12.4±0.4	65.30
W5-1	250m drift	258	940105	Normal	Nittetsu	14.7	8.7	181	395	79.9	8.90	0.20	0.00	6.50	0.1	0	<0.01	12.20	5.70	1.70	8.60	23.90	0.40	<0.05	1.00	4.80	5.80	-67.5	-10.7	11.8±0.4	62.00
W5-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	9.50	0.30	0.00	6.70	<0.1	<0.02	-	11.40	5.30	2.00	9.50	-	-	0.10	0.80	4.90	5.70	-	-	-	-
W5-2	250m drift	258	940208	Normal	Nittetsu	15.7	8.7	183	398	77.6	8.60	0.20	0.00	6.80	<0.1	0	<0.01	12.60	5.90	1.90	8.70	26.90	0.50	0.10	1.20	5.40	6.60	-67.6	-10.6	10.8±0.4	65.70
W5-3	250m drift	258	940309	Normal	Nittetsu	15.3	8.6	159	372	77.4	8.80	0.20	0.00	6.40	<0.1	<0.01	<0.01	12.40	5.80	1.90	9.00	26.50	0.40	0.10	0.80	5.70	6.30	-68.8	-10.7	13.5±0.4	67.20
W5-4	250m drift	258	940413	Normal	Nittetsu	15.6	9.1	116	329	77.4	9.20	0.20	0.00	6.20	0.1	0	<0.01	11.80	5.50	1.90	9.20	22.80	1.10	0.10	0.90	4.70	5.60	-68.7	-10.6	10.4±0.2	61.30
W6-9	250m drift	258	930901	Normal	PNC TONO	14.0	9.0	93	307	76.7	10.90	0.20	<0.01	6.00	<0.1	<0.02	-	11.30	5.30	1.90	9.30	26.50	0.90	0.10	0.90	5.40	6.30	-	-	-	66.11
W7-9	250m drift	258	930901	Normal	PNC TONO	14.0	9.4	-1	213	83.1	10.60	0.20	<0.01	5.00	<0.1	<0.02	-	11.90	5.60	2.00	10.30	25.20	2.30	0.10	1.70	5.40	7.10	-	-	-	65.21
W7-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.3	9.6	145	358	77.0	10.50	0.30	<0.01	5.00	<0.1	<0.02	-	12.30	5.90	2.00	10.40	17.30	2.50	0.10	1.40	3.90	5.30	-	-	-	57.81
W7-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	11.30	0.20	<0.01	5.00	<0.1	<0.02	-	12.70	5.90	2.00	9.10	-	-	0.10	0.90	3.40	4.30	-	-	-	-
W8-9	250m drift	258	930901	Normal	PNC TONO	13.9	9.6	-9	205	77.1	9.60	0.20	<0.01	5.60	<0.1	<0.02	-	12.30	5.70	2.00	9.10	22.30	3.20	0.10	0.80	5.00	5.90	-	-	-	61.11
W8-10	250m drift	258	931018	Normal	Nittetsu	14.9	9.9	118	331	75.3	5.70	0.20	0.00	5.80	<0.1	<0.01	<0.01	10.90	5.10	1.60	8.40	19.50	2.90	<0.05	0.70	4.40	5.10	-69.2	-10.7	11.8±0.2	52.10
W8-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.8	9.5	125	338	74.6	6.00	0.30	<0.01	5.20	<0.1	<0.02	-	12.20	5.70	2.00	9.00	17.20	2.00	0.10	0.30	3.80	4.10	-	-	-	51.91
W8-12	250m drift	258	931215	Normal	Nittetsu	15.6	9.5	96	308	78.1	8.90	0.20	0.00	6.00	<0.1	0	<0.01	13.00	6.10	1.80	8.20	19.50	2.30	<0.05	0.50	4.30	4.80	-64.8	-10.8	10.7±0.4	57.60
W8-1	250m drift	258	940105	Normal	Nittetsu	15.3	9.5	79	292	77.2	9.00	0.20	0.00	6.00	<0.1	0	<0.01	13.30	6.20	1.80	8.30	17.70	2.10	<0.05	0.50	3.90	4.40	-67.3	-10.9	9.9±0.4	56.30
W8-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	9.70	0.20	<0.01	5.80	<0.1	<0.02	-	12.30	5.70	2.00	10.80	-	-	0.10	0.50	3.50	4.00	-	-	-	-
W8-2	250m drift	258	940203	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	8.90	0.30	<0.01	5.80	<0.1	<0.02	-	11.70	5.50	1.90	8.80	-	-	0.10	1.10	4.00	5.10	-	-	-	-
W8-2	250m drift	258	940208	Normal	Nittetsu	15.4	9.6	137	350	78.1	8.60	0.20	0.00	6.10	<0.1	0	<0.01	13.50	6.30	1.90	8.20	18.10	2.10	0.10	1.90	4.00	5.90	-67.9	-10.7	12.9±0.4	58.60
W8-3	250m drift	258	940309	Normal	Nittetsu	15.3	9.4	78	291	76.2	8.80	0.20	0.00	5.90	<0.1	<0.01	<0.01	12.80	6.00	1.80	8.40	20.40	1.90	0.10	0.70	4.40	5.10	-66.6	-10.8	11.8±0.4	58.30
W8-4	250m drift	258	940413	Normal	Nittetsu	15.1	9.6	115	328	77.1	9.30	0.20	0.00	5.60	<0.1	0	<0.01	12.20	5.70	1.80	8.70	16.40	2.30	0.10	2.40	3.70	6.10	-	-	10.4±0.2	54.20
W9-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.3	9.9	-85	129	78.4	10.80	0.20	<0.01	4.30	<0.1	<0.02	-	15.10	7.00	2.10	10.10	18.90	4.00	0.10	0.90	4.50	5.40	-	-	-	61.51
W9-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.8	9.7	126	339	77.3	10.50	0.30	<0.01	4.30	<0.1	<0.02	-	14.90	7.00	2.10	10.00	13.30	2.40	0.10	1.30	3.10	4.40	-	-	-	55.41
W9-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	11.60	0.30	<0.01	4.50	<0.1	<0.02	-	14.80	6.90	2.10	10.20	-	-	0.10	0.30	3.70	4.00	-	-	-	-
W10-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.4	9.5	-43	171	78.9	10.70	0.20	<0.01	4.70	<0.1	<0.02	-	12.10	5.60	2.00	10.30	24.40	2.90	0.10	1.10	5.40	6.50	-	-	-	64.41
W10-10	250m drift	258	931018	Normal	Nittetsu	14.9	9.5	151	344	84.9	11.00	0.20	0.00	4.60	<0.1	<0.01	<0.01	10.90	5.10	1.60	9.60	21.30	2.50	<0.05	1.40	4.70	5.10	-68.5	-10.7	9.2±0.1	59.20
W10-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.9	9.5	137	350	78.6	10.60	0.30	<0.01	4.50	<0.1	<0.02	-	12.20	5.70	2.10	10.20	18.30	1.90	0.10	1.60	3.80	5.10	-	-	-	56.21
W10-12	250m drift	258	931215	Normal	Nittetsu	15.3	9.8	129	342	81.0	10.80	0.20	0.00	4.80	<0.1	0	<0.01	13.30	6.20	1.80	9.60	18.70	3.50	<0.05	1.60	4.00	5.60	-65.6	-10.9	10.9±0.4	57.20
W10-1	250m drift	258	940105	Normal	Nittetsu	15.4	9.2	120	333	79.5	10.90	0.20	0.00	4.80	0.1	0	<0.01	13.30	6.20	1.80	9.40	18.70	1.10	<0.05	0.70	3.90	4.60	-66.7	-10.6	11.2±0.4	59.10
W10-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	11.70	0.20	<0.01	4.60	<0.1	<0.02	-	12.20	5.70	2.00	10.40	-	-	0.10	0.30	3.90	4.20	-	-	-	-
W10-2	250m drift	258	940208	Normal	Nittetsu	15.7	9.6	128	341	79.1	10.50	0.20	0.00	4.90	<0.1	<0.01	<0.01	13.70	6.40	1.90	9.20	17.30	2.50	0.10	1.10	3.90	5.00	-66.1	-10.5	10.1±0.4	57.70
W10-3	250m drift	258	940309	Normal	Nittetsu	15.4	9.0	94	307	78.5	10.80	0.20	0.00	4.70	<0.1	<0.01	<0.01	12.80	6.00	2.00	9.80	22.10	0.80	0.10	0.50	4.50	5.00	-67.8	-10.7	11.2±0.4	62.40
W10-4	250m drift	258	940413	Normal	Nittetsu	15.6	9.7	62	275	81.1	11.60	0.20	0.00	4.40	0.1	<0.01	<0.01	12.20	5.70	1.80	10.40	15.80	2.90	0.10	0.60	3.70	4.30	-68.6	-10.7	8.5±0.1	56.40
94-W10-10	250m drift	258	941013	Normal	Nittetsu	15.4	9.5	99	282	83.7	9.80	0.30	<0.02	3.90	<0.1	<0.3	<0.05	13.40	6.30	1.50	9.80	23.70	2.80	0.70	1.10	5.20	6.30	-65.4	-10.5	8.8±0.1	62.42
94-W10-11	250m drift	258	941116	Normal	Nittetsu	15.6	9.3	81	274	81.3	10.10	0.30	<0.02	4.60	<0.1	0.4	<0.05	13.10	6.10	1.60	9.70	20.30	1.50	0.40	0.90	4.30	5.20	-68.5	-10.9	9.8±0.2	59.72
94-W10-12	250m drift	258	941215	Normal	Nittetsu	15.7	8.9	117	330	80.6	11.00	0.20	<0.02	4.40	<0.1	<0.3	<0.05	12.40	5.80	1.50	9.60	22.80	0.70	0.30	0.60	4.60	5.20	-67.7	-10.8	9.1±0.2	61.92
95-W10-1	250m drift	258	950111	Normal	Nittetsu	15.3	9.6	129	342	80.8	9.70	0.20	<0.02	4.20	<0.1	<0.3	<0.05	12.70	5.90	1.80	10.00	19.20	2.80	<0.1	0.60	4.30	4.90	-68.5	-10.8	8.8±0.1	57.82
95-W10-2	250m drift	258	950214	Normal	Nittetsu	15.8	9.5	126	341	80.9	10.00	0.20	<0.02	4.60	<0.1	<0.3	<0.05	13.10	6.10	1.70	10.60	31.80	3.70	0.30	0.40	7.00	7.40	-69.6	-10.7	9.1±0.2	72.02
95-W10-3	250m drift	258	950315	Normal	Nittetsu	15.6	9.3	157	370	81.6	10.30	0.20	<0.02	4.40	<0.1	<0.3	<0.05	12.80	6.00	1.90	11.30	30.10	2.20	0.20	0.50	6.40	6.90	-70.4	-10.9	9.2±0.2	71.02
W11-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.6	10.0	-50	184	83.6	15.10	0.30	<0.01	2.60	<0.1	<0.02	-	16.80	7.90	2.20	13.90	19.60	5.20	0.10	1.40	4.50	5.90	-	-	-	70.51
W11-10	250m drift	258	931018	Normal	Nittetsu	15.2	9.7	140	353	88.3	14.40	0.20	0.00	2.70	<0.1	<0.01	<0.01	15.80	7.40	1.60	8.70	18.40	3.40	<0.05	1.40	4.30	5.70	-70.1	-10.8	8.8±0.1	59.80
W11-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.5	9.4	163	378	80.2	13.40	0.40	<0.01	2.60	<0.1	<0.02	-	16.80	7.80	2.00	7.10	21.70	2.80	0.10	1.00	4.80	5.80	-	-	-	64.01
W11-12	250m drift	258	931215	Normal	Nittetsu	15.2	9.3	131	344	83.4	13.90	0.30	0.00	2.90	<0.1	0	0.00	18.00	8.40	1.80	6.40	23.10	1.70	0.10	0.70	4.90	5.60	-66.6	-11	7.9±0.4	66.40
W11-1	250m drift	258	940105	Normal	Nittetsu	15.1	9.7	132	343	82.8	14.60	0.30	0.00	2.90	<0.1	<0.01	<0.01	16.40	8.60	1.80	6.30	21.40	3.90	<0.05	0.80	5.00	5.80	-69.3	-10.9	8.0±0.4	65.70
W11-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	14.90	0.30	<0.01	2.80	<0.1	<0.02	-	17.10	8.00	2.10	7.00	-	-	0.10	0.80	5.30	5.90	-	-	-	-
W11-2	250m drift	258	940208	Normal	Nittetsu	15.7	9.6	153	368	81.1	13.50	0.30	0.00	2.90	<0.1	<0.01	<0.01	16.60	8.70	2.00	8.90	24.90	2.90	0.10	1.40	5.60	6.90	-71.1	-10.8	8.0±0.4	68.10
W11-3	250m drift	258	940309	Normal	Nittetsu	15.3	8.6	138	351	79.5	14.30	0.30	0.00	2.90	<0.1	0	<0.01	17.80	8.30	2.00	6.20	33.00	0.90	0.10	1.20	6.60	7.80	-	-10.9	8.4±0.4	76.50
W11-4	250m drift	258	940413	Normal	Nittetsu	15.2	9.6	91	304	81.8	14.80	0.30	0.00	2.60	0.1	0	<0.01	16.90	7.90	1.80	6.60	26.20	3.70	<0.05	0.80	5.90	6.70	-70.7	-10.9	8.9±0.1	69.20
W12-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.4	9.0	48	262	79.4	14.10	0.30	<0.01	2.60	<0.1	<0.02	-	15.20	7.10	2.20	10.70	25.40	0.90	0.10	2.70	5.20	7.90	-	-	-	70.51
W12-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	14.50	0.40	<0.01	2.70	<0.1	<0.02	-	15.40	7.20	1.90	4.70	-	-	0.10	0.80	4.20	5.00	-	-	-	-
W13-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.6	9.8	49	263	74.5	13.50	0.30	<0.01	2.60	<0.1	<0.02	-	13.00	6.10	2.00	9.80	21.90	4.70	0.10	1.40	5.30	6.50	-	-	-	63.11
W13-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	14.80	0.20	<0.01	2.70	<0.1	<0.02	-	13.40	6.20	1.90	4.20	-	-	0.10	0.30	3.90	4.20	-	-	-	-

表-5.3 地表水・地下水の物理化学パラメータ測定・水質および同位体分析結果（その3）

Sample	Location	Altitude (m)	Date	Sampling method	Laboratory	Temp (℃)	pH	ORP (mV)	Eh (mV)	EC (μS/cm)	Na+ (ppm)	K+ (ppm)	Mg+ (ppm)	Ca++ (ppm)	Al+++ (ppm)	T.Fe (ppm)	Fe++ (ppm)	SiO2 (ppm)	Si++++ (ppm)	Cl- (ppm)	SO4-- (ppm)	HCO3- (ppm)	CO3-- (ppm)	F- (ppm)	TDC (ppm)	IC (ppm)	TC (ppm)	δD (‰)	δ18-O (‰)	3-H (T.U.)	Dissolved solid (mg/l)
W14-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.4	9.6	58	272	78.4	13.50	0.20	<0.01	2.90	<0.1	<0.02	-	12.80	0.00	2.00	9.60	27.40	3.90	0.10	1.10	6.20	7.30	-	-	-	68.41
W14-10	250m drift	258	931018	Normal	Nittetsu	15.1	8.4	152	365	76.2	15.30	0.20	0.00	3.90	<0.1	<0.01	<0.01	12.80	0.00	1.80	3.90	23.50	0.50	<0.05	1.00	4.70	5.70	-99.8	-10.7	10.5±0.2	61.10
W14-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	15.9	9.6	138	351	78.6	11.70	0.30	<0.01	2.70	<0.1	<0.02	-	12.50	5.90	1.80	4.50	-	-	0.10	0.80	4.20	5.00	-	-	-	33.61
W14-12	250m drift	258	931215	Normal	Nittetsu	15.4	9.9	113	326	79.7	12.20	0.20	0.00	3.10	<0.1	0	<0.01	13.30	6.20	1.80	4.00	18.70	4.50	<0.05	0.80	4.60	5.20	-84	-10.8	12.7±0.4	53.10
W14-1	250m drift	258	940105	Normal	Nittetsu	15.8	9.9	97	310	78.3	12.70	0.20	0.00	3.10	<0.1	0	<0.01	13.50	6.30	1.80	4.00	17.90	4.30	<0.05	0.80	4.40	5.00	-87.8	-10.7	12.1±0.4	53.00
W14-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	14.10	0.20	<0.01	2.80	<0.1	<0.02	-	12.40	5.80	1.80	4.60	-	-	0.10	0.40	3.60	4.00	-	-	-	-
W14-2	250m drift	258	940208	Normal	Nittetsu	15.7	9.9	126	339	77.3	12.10	0.20	0.00	3.20	<0.1	<0.01	<0.01	13.70	6.40	1.70	3.80	16.30	4.00	0.10	0.70	4.00	4.70	-87.7	-10.7	9.0±0.4	51.00
W14-3	250m drift	258	940309	Normal	Nittetsu	15.2	9.6	108	321	78.5	12.80	0.20	0.00	3.00	<0.1	<0.01	<0.01	13.30	6.20	1.70	3.90	20.50	4.30	0.10	0.80	4.90	5.40	-87.7	-10.7	12.6±0.4	55.40
W14-4	250m drift	258	940413	Normal	Nittetsu	15.2	9.9	31	244	78.7	13.00	0.20	0.00	2.80	0.1	<0.01	<0.01	12.20	5.70	1.60	4.30	16.70	4.10	<0.05	0.70	4.10	4.80	-70.7	-10.6	11.1±0.2	50.80
94-W14-10	250m drift	258	941013	Normal	Nittetsu	15.3	9.8	53	266	78.0	11.10	0.30	<0.02	2.40	<0.1	<0.3	<0.05	12.60	5.90	1.40	4.40	27.10	8.80	0.70	1.10	6.50	7.60	-64.9	-10.5	10.9±0.2	59.32
94-W14-11	250m drift	258	941116	Normal	Nittetsu	15.2	9.8	33	246	77.1	11.00	0.30	<0.02	2.90	<0.1	<0.3	<0.05	12.90	6.00	1.50	4.40	20.10	4.30	0.20	0.80	4.80	5.70	-68	-10.7	10.1±0.2	53.12
94-W14-12	250m drift	258	941215	Normal	Nittetsu	15.4	9.7	118	329	75.6	11.30	0.30	<0.02	2.80	<0.1	<0.3	<0.05	11.80	5.50	1.30	4.00	30.20	6.50	0.20	0.90	7.10	8.00	-67.6	-10.7	11.3±0.2	61.72
95-W14-1	250m drift	258	950111	Normal	Nittetsu	15.2	9.9	119	332	77.9	10.90	0.30	<0.02	2.70	<0.1	<0.3	<0.05	12.40	5.80	1.70	4.40	19.80	4.70	0.10	0.80	4.80	5.40	-67.5	-10.8	9.8±0.1	52.02
95-W14-2	250m drift	258	950214	Normal	Nittetsu	15.7	9.8	100	313	76.7	11.40	0.30	<0.02	3.00	<0.1	<0.3	<0.05	12.20	5.70	1.60	4.30	31.90	6.80	0.10	0.50	7.80	8.10	-69.5	-10.5	11.1±0.2	64.72
95-W14-3		258	950315	Normal	Nittetsu	15.5	9.8	136	349	77.5	11.30	0.20	<0.02	2.80	<0.1	<0.3	<0.05	12.60	5.90	1.80	4.90	32.00	6.80	0.20	0.40	7.70	8.10	-71.1	-10.8	11.6±0.2	65.62
W15-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.5	9.9	62	276	77.7	13.20	0.20	<0.01	2.80	<0.1	<0.02	-	12.10	5.60	1.70	3.30	21.40	5.20	0.10	0.60	5.60	6.10	-	-	-	64.71
W15-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	13.50	0.20	<0.01	2.70	<0.1	<0.02	-	13.10	6.10	1.90	4.80	-	-	0.10	0.20	3.90	4.10	-	-	-	-
W16-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.5	10.0	65	279	75.4	12.40	0.30	<0.01	3.30	<0.1	<0.02	-	11.60	5.40	1.70	3.30	22.00	5.80	0.10	0.60	5.50	6.10	-	-	-	0.00
W16-10	250m drift	258	931018	Normal	Nittetsu	15.0	9.8	79	292	74.9	9.10	0.30	0.00	3.20	<0.1	<0.01	<0.01	10.10	4.70	1.20	2.80	18.40	3.90	<0.05	0.90	4.40	5.30	-99.5	-10.8	8.7±0.1	54.61
W16-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	16.3	9.6	99	311	75.8	10.40	0.40	<0.01	3.00	<0.1	<0.02	-	11.50	5.40	1.70	3.00	-	-	0.00	1.00	4.20	5.20	-	-	-	45.10
W16-12	250m drift	258	931215	Normal	Nittetsu	16.1	9.8	55	267	75.2	11.50	0.30	0.00	3.50	0.1	<0.01	<0.01	12.40	5.80	1.60	2.70	19.80	4.20	<0.05	0.50	4.70	5.20	-66	-10.9	10.7±0.4	51.80
W16-1	250m drift	258	940105	Normal	Nittetsu	15.8	9.9	102	315	75.8	12.00	0.20	0.00	3.50	0.1	0	<0.01	12.80	5.90	1.50	2.60	18.10	4.60	<0.05	1.00	4.70	5.70	-67.1	-10.8	9.5±0.4	51.50
W16-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	9.80	0.30	<0.01	3.20	<0.1	<0.02	-	11.50	5.40	1.70	3.00	-	-	0.10	0.70	3.80	4.30	-	-	-	-
W16-2	250m drift	258	940208	Normal	Nittetsu	15.9	9.9	119	332	78.0	11.00	0.30	0.00	3.60	<0.1	<0.01	<0.01	12.80	6.00	1.60	2.30	18.70	4.50	<0.05	0.60	4.60	5.10	-67.3	-10.6	9.0±0.4	50.30
W16-3	250m drift	258	940309	Normal	Nittetsu	15.3	9.7	5	218	75.2	11.80	0.30	0.00	3.40	<0.1	<0.01	<0.01	12.20	5.70	1.80	2.50	20.10	3.70	<0.05	0.60	4.70	5.20	-67.6	-10.6	10.7±0.4	52.10
W16-4	250m drift	258	940413	Normal	Nittetsu	15.4	9.8	30	243	74.5	11.50	0.30	0.00	3.20	0.1	<0.01	<0.01	11.10	5.20	1.60	2.50	17.10	3.60	<0.05	1.10	4.10	5.20	-69.1	-10.6	7.9±0.1	47.30
94-W16-10	250m drift	258	941013	Normal	Nittetsu	15.5	9.8	45	258	62.7	10.30	0.40	<0.02	2.80	<0.1	<0.3	<0.05	11.90	5.60	1.40	2.60	27.80	8.90	0.50	1.10	6.70	7.70	-64.2	-10.4	7.8±0.1	57.22
94-W16-11	250m drift	258	941116	Normal	Nittetsu	15.3	9.8	27	240	75.2	10.30	0.40	<0.02	3.10	<0.1	<0.3	0.30	11.90	5.60	1.50	1.50	19.30	4.10	0.20	0.60	4.60	5.20	-67.8	-10.6	8.3±0.1	48.02
94-W16-12	250m drift	258	941215	Normal	Nittetsu	15.5	9.8	93	306	74.6	10.20	0.30	<0.02	3.20	<0.1	<0.3	0.10	11.30	5.30	1.20	2.30	19.30	4.10	0.20	0.50	4.60	5.10	-66.5	-10.6	8.7±0.1	47.82
95-W16-1	250m drift	258	950111	Normal	Nittetsu	15.4	9.9	128	341	75.5	10.00	0.30	<0.02	3.00	<0.1	<0.3	0.10	11.60	5.40	1.60	2.80	19.70	4.80	0.10	0.60	4.80	5.40	-66.7	-10.6	8.5±0.1	49.02
95-W16-2	250m drift	258	950214	Normal	Nittetsu	15.8	9.8	99	311	78.6	10.30	0.30	<0.02	3.30	<0.1	<0.3	0.20	11.50	5.40	1.50	2.70	33.10	7.00	<0.1	0.40	7.90	8.40	-69.5	-10.5	8.6±0.1	62.72
95-W16-3	250m drift	258	950315	Normal	Nittetsu	15.8	9.8	134	347	75.2	10.70	0.20	<0.02	3.10	<0.1	<0.3	0.30	11.60	5.40	1.70	3.00	32.00	6.80	<0.1	0.40	7.70	8.10	-69.1	-10.8	9.2±0.2	62.32
95-W16-4	250m drift	258	950412	Normal	PNC TONO	15.4	9.9	119	332	76.8	12.10	0.30	<0.01	3.20	<0.1	<0.02	-	11.57	5.40	1.80	3.10	20.71	5.01	0.00	0.90	4.00	7.80	-	-	-	52.79
95-W16-5	250m drift	258	950517	Normal	PNC TONO	15.5	9.7	120	333	75.1	11.90	0.30	<0.01	3.30	<0.1	<0.02	-	11.78	5.50	1.60	2.90	33.10	7.03	0.00	1.50	5.90	7.40	-	-	-	64.90
W17-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	15.5	10.5	-306	-92	117.9	18.00	0.10	<0.01	2.70	<0.1	<0.02	-	25.50	11.90	3.00	11.40	15.80	7.30	0.40	1.00	4.80	5.80	-	-	-	76.51
W17-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	20.90	0.10	<0.01	2.60	<0.1	<0.02	-	26.00	12.10	3.00	10.30	-	-	0.40	0.50	2.00	2.50	-	-	-	-
W18-9	250m drift	258	930902	Normal	PNC TONO	14.8	10.0	-10	203	83.6	12.90	0.10	<0.01	2.60	<0.1	<0.02	-	12.30	5.70	1.80	5.50	27.00	7.10	0.10	1.10	6.70	7.80	-	-	-	62.21
W18-10	250m drift	258	931018	Normal	Nittetsu	15.4	9.9	125	338	83.6	15.30	0.10	0.00	2.70	<0.1	<0.01	<0.01	11.10	5.20	1.60	5.10	21.60	5.20	<0.05	1.60	5.30	6.90	-67.9	-10.7	8.4±0.1	57.60
W18-12	250m drift	258	931209	Normal	PNC TONO	16.0	9.8	185	398	86.5	13.60	0.20	0.00	2.50	<0.1	<0.02	-	12.30	5.70	1.80	5.40	-	-	0.10	1.40	4.80	6.00	-	-	-	35.80
W18-12	250m drift	258	931215	Normal	Nittetsu	15.5	9.7	106	318	85.1	14.10	0.10	0.00	2.70	0.2	<0.01	<0.01	13.00	6.10	1.70	4.60	20.10	3.70	<0.05	1.00	4.70	5.70	-64.8	-10.9	10.7±0.4	56.50
W18-1	250m drift	258	940105	Normal	Nittetsu	15.7	9.7	123	336	84.9	14.40	0.10	0.00	2.70	0.2	0	<0.01	13.30	6.20	1.60	4.80	21.40	3.90	<0.05	0.90	5.00	5.90	-68.1	-10.9	9.9±0.4	58.30
W18-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	15.70	0.10	0.00	2.60	<0.1	<0.02	-	12.30	5.80	1.90	5.50	-	-	0.10	0.50	4.40	4.90	-	-	-	-
W18-2	250m drift	258	940208	Normal	Nittetsu	15.9	9.8	154	367	83.4	13.90	0.10	0.00	2.60	<0.1	0	<0.01	13.90	6.50	1.70	4.70	20.40	2.90	0.10	0.80	4.80	5.40	-68	-10.7	10.6±0.4	57.50
W18-3	250m drift	258	940309	Normal	Nittetsu	15.6	9.7	47	200	83.4	14.40	0.10	0.00	2.70	0.1	<0.01	<0.01	13.30	6.20	1.70	4.60	21.80	4.00	0.10	0.60	5.10	5.70	-68.9	-10.7	7.3±0.4	58.80
W18-4	250m drift	258	940413	Normal	Nittetsu	15.7	9.8	62	265	84.3	14.50	0.10	0.00	2.40	0.2	<0.01	<0.01	11.80	5.50	1.70	5.20	18.40	3.90	0.10	1.40	4.40	5.80	-69	-10.7	8.6±0.2	54.10
W19-1	250m drift	258	940126	Normal	PNC TONO	-	-	-	-	-	13.10	0.20	<0.01	3.90	<0.1	<0.02	-	17.10	8.00	2.30	9.10	-	-	0.20	0.60	3.00	3.60	-	-	-	-
W20-10	550m drift	575	931018	Normal	Nittetsu	11.4	9.1	22	238	81.1	4.50	0.30	0.00	10.60	<0.1	<0.01	<0.01	9.20	4.30	1.90	6.90	33.00	15.20	<0.05	0.90	6.80	7.70	-69.7	-10.7	8.4±0.1	98.40
W20-12	550m drift	575	931215	Normal	Nittetsu	12.1	8.4	22	238	82.0	8.40	0.30	0.10	10.70	<0.1	0	<0.01	11.50	5.40	2.00	6.90	29.00	0.40	<0.05	0.50	5.80	6.30	-70.5	-10.9	7.9±0.4	86.90
W20-1	550m drift	575	940105	Normal	Nittetsu	11.5	8.9	153	369	81.8	5.60	0.30	0.10	10.70	<0.1	0	<0.01	11.80	5.50	2.00	6.90	31.60	0.90	<0.05	0.90	6.40	7.30	-67.5	-11	8.7±0.4	89.00
W20-2	550m drift	575	940208	Normal	Nittetsu	12.2	8.8	169	384	81.5	5.10	0.40	0.10	11.20	<0.1	<0.01	<0.01	12.00	5.80	2.20	6.60	32.80	0.70	0.10	1.30	6.60	7.90	-68.9	-10.9	8.5±0.4	70.40
W20-3	550m drift	575	940309	Normal	Nittetsu	11.7	8.7	123	339	81.8	5.50	0.40	0.10	10.50	<0.1	<0.01	<0.01	12.00	5.80	2.10	6.70	31.90	0.60	<0.05	0.90	6.40	7.00	-67.9	-10.7	7.5±0.4	89.20
W20-4	550m drift	575	940413	Normal	Nittetsu	11.7	8.0	80	296	81.7	5.20	0.30	0.10	10.90	0.1	<0.01	<0.01	10.70	5.00	2.10	7.10	31.40	1.10	<0.05	0.90	6.40	7.00	-68.7	-10.7	8.2±0.1	87.80
94-W20-10	550m drift	575	941013	Normal	Nittetsu	11.9	8.0	183	399	83.5	5.00	0.50	0.10	9.30	<0.1	0.3	<0.05	11.10	5.20	1.80	6.30	38.00	0.50	<0.1	1.70	7.60	9.20	-65.2	-10.6	8.8±0.1	72.10
94-W20-11	550m drift	575	941116	Normal	Nittetsu	11.6	8.0	113	329	84.7	4.60	0.40	0.10	10.30	<0.1	0.2	<0.05	11.00	5.10	1.80	7.30	35.30	0.50	0.20	0.90	7.10	8.00	-66.3	-10.6	8.7±0.1	70.80
94-W20-12	550m drift	575	941215	Normal	Nittetsu	11.8	8.4	160	376	81.9	4.90	0.40	0.10	10.60	<0.1	<0.3	<0.05	10.60	5.00	1.60	6.30	22.60	0.30	0.10	0.60	4.50	5.10	-66.8	-10.8	7.2±0.1	67.10
95-W20-1	550m drift	575	950111	Normal	Nittetsu	11.7	8.0	203	419	83.1	4.70	0.40	0.10	10.30	<0.1	<0.3	<0.05	10.60	5.00	2.00	7.00	36.80	0.50	0.30	0.60	7.40	7.90	-68	-10.9	8.6±0.1	72.10
95-W20-2	550m drift	575	950214	Normal	Nittetsu	12.1	7.9	181	378	82.8	4.90	0.40	0.10	10.80	<0.1	<0.3	0.10	11.20	5.20	1.90	7.00	35.90	0.50	0.10	0.50	7.10	7.60	-69.3	-10.6	8.6±0.1	71.90
95-W20-3	550m drift	575	950315	Normal	Nittetsu	12.0	7.7	193	409	83.3	5.00	0.30	0.10	10.40	<0.1	<0.3	<0.05	10.60	5.00	2.20	7.50	39.40	0.60	<0.1	0.50	7.90	8.30	-69.2	-10.9	7.4±0.1	75.50

注釈1：炭酸濃度に関して
・TOCおよびICを分析していないものについては、炭酸濃度(HCO3+CO3)を地下水採水時の水温、pHでの炭酸の存在比率に基づき、計算により算出した。

注釈2：KG-1地下水に関して（HGP-10による採水の場合、物理化学パラメーターを1週間程度連続モニタリング）
・ORPは、本採水時の原位置センサー（Au電極）の値である。

注釈3：KH-1地下水に関して
・Locationに記してある数値は、550mレベル坑道床盤を0mとして、各採水区間の深度を記したものである。
・KH-1での採水区間は、長い区間で約100m程度あるため、採水ポイントの正確な標高は不明である。そこで、本資料では、採水区間の中間点を、その採水区間の標高として記してある。

注釈4：Sampling methodに関して
・Normal ：地表水や坑道に流入する地下水の場合で、現場でサンプル瓶に採取。
・Packer：パッカーで区切られた区間の地下水（自然湧水）を現場でサンプル瓶に採取（KH-1地下水）
・MP55(HGP-10)：MPシステムにより区切られた区間の地下水をHGP-10を用いて連続採水。
・MP55(MOSDAX)：MPシステムにより区切られた区間の地下水をMOSDAXプローブを用いてバッチ採水。

表-6 KG-1孔地下水の物理化学パラメータ測定・ガス・水質・同位体・微生物分析結果

測定項目	単位	MOSDAX-2350		
		KG-1-2 1994.11.18	KG-1-3 1994.12.2	KG-1-4 1995.1.21
水温	(℃)	13.2	10.9	11.1
pH	-	9.97	9.33	8.95
Eh	(mV)	342	345	358
EC	(μS/cm)	81	106	118
DO	(ppm)	0.2	0.1	0.0
O2(g)	(mg/l)	-	N.D.	N.D.
N2(g)	(mg/l)	-	45.6	43.2
H2(g)	(mg/l)	-	0.09	0.09
He(g)	(mg/l)	-	0.05	0.05
CH4(g)	(μg/l)	-	N.D.	N.D.
CO(g)	(μg/l)	-	N.D.	N.D.
ΣCO2(g)	(mg/l)	-	6.70	9.30
Si++++	(mg/l)	7.30	4.0	3.0
SiO2	(mg/l)	16.30	9.69	6.65
Na+	(mg/l)	11.0	17.30	14.70
K+	(mg/l)	0.62	0.56	0.77
Li+	(mg/l)	<0.09	<0.09	<0.09
Ca++	(mg/l)	6.29	7.21	6.8
Mg++	(mg/l)	0.00	0.10	0.34
Sr++	(mg/l)	0.011	0.009	0.009
Al+++	(mg/l)	0.311	0.17	0.12
Mn	(mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01
T-Fe	(mg/l)	0.002	0.004	0.004
Fe++	(mg/l)	0.002	0.002	-
Cl-	(mg/l)	1.86	2.93	3.51
F-	(mg/l)	0.19	0.35	0.01
I-	(mg/l)	<0.07	<0.07	<0.07
ΣS-	(mg/l)	<0.9	<0.9	<0.9
T-P	(mg-P/l)			
PO4-(P)	(mg-P/l)	0.0210	0.0180	0.0090
SO4-	(mg/l)	8.93	17.1	8.57
HCO3-	(mg/l)	28.40	31.81	45.67
CO3-	(mg/l)	6.88	2.36	1.61
NO2-(N)	(mg-N/l)	<0.005	<0.005	0.032
NO3-(N)	(mg-N/l)	<0.005	<0.005	<0.005
NH4+(N)	(mg-N/l)	0.062	0.044	0.011
Inorganic Carbon	(mg/l)	6.97	6.74	9.32
Total Organic Carbon	(mg/l)	0.42	0.23	0.82
フミン酸	(mg/l)	<0.5	<0.5	<0.5
フルボ酸	(mg/l)	<1.0	<1.0	<1.0
δD	‰	-73	-73.1	-67.5
δ18-O	‰	-11.1	-10.6	-10.1
3-H	T.U.	2.8±0.1	3.4±0.1	4.7±0.1
全菌数	(cells/ml)	7.5E+05	9.2E+05	-
鉄酸化細菌	(MPN/ml)	N.D.	N.D.	-
硫酸塩還元細菌	(CFU/ml)	2.9E+03	1.3E+02	-
	(MPN/ml)	1.8E+03	8.9E+01	-
メタン生成細菌	(MPN/ml)	N.D.	N.D.	-
アンモニア酸化細菌	(MPN/ml)	N.D.	N.D.	-
亜硝酸酸化細菌	(MPN/ml)	N.D.	N.D.	-
硝酸還元細菌	(MPN/ml)	2.8E+01	1.5E+03	-
脱窒細菌	(MPN/ml)	2.0E+00	1.3E+05	-

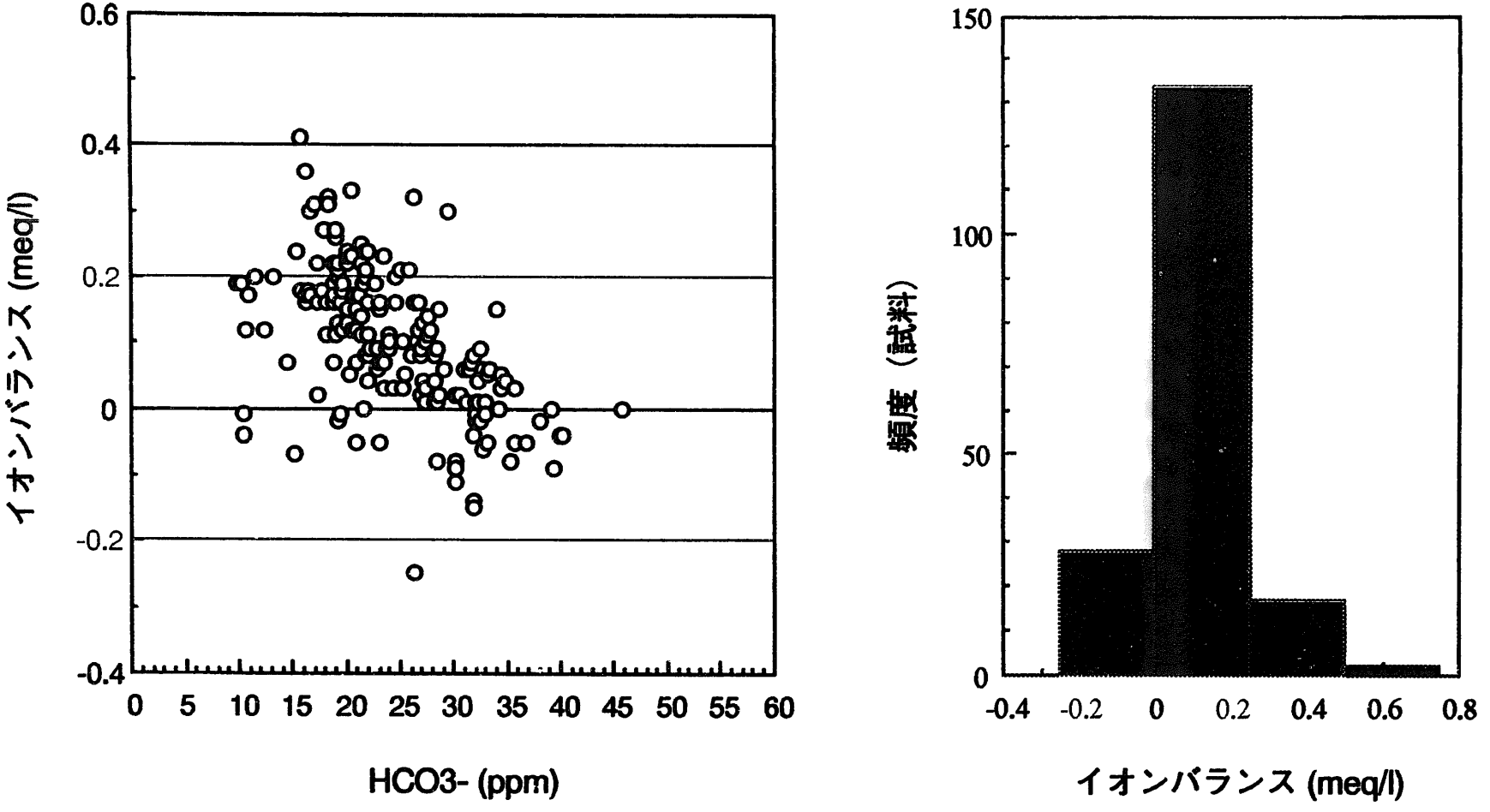


図-7　地表水および地下水のイオンバランスのチェックの結果

左側：地表水および地下水中のHCO3-濃度とイオンバランスの関係

右側：地表水および地下水のイオンバランスのヒストグラム

① 全菌数計測

全菌数（生菌・死菌）はKG-1-2で 7.5×10^{5}(cells/ml)，KG-1-3で 9.2×10^{5}(cells/ml）であった。

② 各種の生菌計測

(a) 鉄酸化細菌

KG-1-2およびKG-1-3ともにThiobacillus ferrooxidans は検出されなかった。

(b) 硫酸塩還元細菌

ＭＰＮ法の場合，KG-1-2では 1.8×10^{3}(MPN/ml)，KG-1-3では 8.9×10 (MPN/ml)であった。一方，二重皿法の場合，KG-1-2では 2.9×10^{3}(CFU/ml)，KG-1-3では 1.3×10^{2}(CFU/ml）であった。いずれの方法でも，KG-1-2の方が硫酸塩還元細菌が多い結果が得られた。

(c) メタン生成細菌

KG-1-2およびKG-1-3ともにメタン生成細菌は検出されなかった。

(d) アンモニア酸化細菌

KG-1-2およびKG-1-3ともにアンモニア酸化細菌は検出されなかった。

(e) 亜硝酸酸化細菌

KG-1-2およびKG-1-3ともに亜硝酸酸化細菌は検出されなかった。

(f) 硝酸塩還元細菌

KG-1-2では 2.8×10 (MPN/ml)，KG-1-3では 1.5×10^{3}(MPN/ml）であり，KG-1-3の方が硝酸塩還元細菌が多い結果が得られた。

(g) 脱窒細菌

KG-1-2では 2.0 (MPN/ml)，KG-1-3では 1.3×10^{5}(MPN/ml）であり，KG-1-3の方が脱窒細菌が多い結果が得られた。

③ 硫酸塩還元細菌種の同定

KG-1-2およびKG-1-3で確認された硫酸塩還元細菌は，Desulfovibrio 属であると同定された。

2．2　岩石・鉱物の地球化学データ

地下水の水質形成機構を考察する上で岩石・鉱物に関するデータは，地下水のpH，Ehおよびイオン濃度に影響を与えるため重要である。以下に採水を実施した試錐孔のコアや坑道壁面から採取した試料の岩石・鉱物学的特徴についてまとめる。

2．2．1　採水を実施した試錐孔コアの岩石・鉱物データ

採水を実施した試錐孔はTK－24孔，６孔およびTK－21孔（以上，それぞれ250mレベル坑道の既存試錐孔），KH-1孔（550mレベル坑道から鉛直下向きに約500m掘削された試錐孔）およびKG-1孔（地表から鉛直下向きに約800m掘削された試錐孔）である。このうち，顕微鏡観察やＸ線回折分析等により構成鉱物が同定されているのは，TK－24孔，TK－21孔およびKH-1孔のコアである。以下に各試錐孔コアの岩石・鉱物学的特徴について略述する。

(1)　TK-24 孔

本孔は釜石鉱山の鉱床探査用の試錐孔として1976年に掘削された。本孔は250mレベル坑道東側壁面から斜め下向き約30°で301.0m掘削された試錐孔である。試錐孔コアの岩石・鉱物学的特徴は，金属鉱業事業団（1976）により詳細に記載されている。その概要を以下にまとめる。

本孔は全て栗橋花崗閃緑岩からなる。本孔の栗橋花崗閃緑岩は，中～細粒で灰白・淡褐・灰黒色の黒雲母角閃石花崗閃緑岩であり小規模な閃緑岩の捕獲岩を多数含有する。顕微鏡観察から同定された栗橋花崗閃緑岩の母岩の主な構成鉱物は以下の通りである。

主な構成鉱物：斜長石，角閃石，黒雲母，石英，カリ長石，緑泥石，絹雲母，緑簾石
鉄鉱物（磁鉄鉱等）

本孔での鉱化作用は微弱で，まれに磁硫鉄鉱，黄銅鉱，黄鉄鉱の鉱染が認められる程度である。

(2)　TK-21 孔

本孔は釜石鉱山の鉱床探査用の試錐孔として1977年に掘削された。本孔は250mレベル坑道西側壁面から斜め下向き約30°で480.10m 掘削された試錐孔である。試錐孔コアの岩石・鉱物学的特徴は，金属鉱業事業団（1977）により詳細に記載されている。その概要を以下にまとめる。

本孔は，０～119mの間では栗橋花崗閃緑岩であるが，それ以深（119 ～480m）では甲子層の粘板岩，砂岩および石灰岩からなる。本孔の栗橋花崗閃緑岩は，中～細粒で灰～暗灰色の黒雲母角閃石花崗閃緑岩であり，黒雲母の緑泥石化が顕著に認められる。顕微鏡観察から同定された栗橋花崗閃緑岩の母岩の主な構成鉱物は以下の通りである。

主な構成鉱物：斜長石，角閃石，黒雲母，石英，カリ長石，緑泥石，絹雲母，スフェーン，鉄鉱物（磁鉄鉱等）

本孔に認められる甲子層の主な構成岩石は粘板岩であり，ホルンフェルス化が顕著である。顕微鏡観察から同定された，ホルンフェルス化している粘板岩の主な構成鉱物は以下の通りである。

主な構成鉱物：斜長石，石英，黒雲母，白雲母，董青石，緑泥石，絹雲母，鉄鉱物

(3) KH-1孔

本孔は原位置試験の一環として岩盤の透水性調査や地下水水質分析等を行なうために1989年に掘削された。本孔は550mレベル坑道から鉛直下向きに501.20m 掘削された試錐孔である。

本孔（500m）は全て栗橋花崗閃緑岩からなる。本孔の栗橋花崗閃緑岩は，中～細粒で灰白色の角閃石黒雲母花崗閃緑岩であり，一部にランプロファイアーとアプライトの岩脈を挟在する。X線回折分析により同定された栗橋花崗閃緑岩の母岩の主な構成鉱物は以下の通りである。

主な構成鉱物：斜長石，角閃石，黒雲母，石英，カリ長石，緑泥石，絹雲母，鉄鉱物（磁鉄鉱等）

2．2．2　坑道壁面から採取した試料の岩石・鉱物データ

250mレベル坑道壁面の割れ目No.69，70 付近（地下水の採水ポイントではW５に相当する）で採取された試料のX線回折分析により同定された主な構成鉱物の種類と量比を以下にまとめる。なお，試料採取場所および割れ目No.についての詳細は，笹本ほか（1993）に記述されている。

・栗橋花崗閃緑岩の母岩（未変質部）の構成鉱物
　石英・斜長石＞黒雲母＞角閃石・カリ長石・緑泥石＞絹雲母・スフェーン・磁鉄鉱
・栗橋花崗閃緑岩の変質ハローの部分の構成鉱物
　石英・斜長石＞緑泥石＞絹雲母・角閃石・カリ長石＞方解石・緑簾石・スフェーン
・割れ目充填部の構成鉱物
　方解石＞石英・濁沸石・斜長石・緑泥石・束沸石＞絹雲母・ブドウ石

2．3．地下水データに基づく水質の特徴

2．3．1　地下水の水素・酸素同位体比

地下水の起源や滞留時間の推定において，同位体地球化学の手法は有効と考えられている。同位体の1つの分類の仕方として，安定同位体か放射性同位体かを基準とするものがある。元素の安定同位体は，その元素を含む物質の起源によって異なることが明らかになっているので，これを利用して物質の起源や来歴を推定することが可能である（松尾，1990）。一方，元素の放射性同位体は，それぞれに固有の半減期をもっているので，これを時計として利用すれば，対象とする系（例えば地下水系）に時間軸を導入できるので地下水の滞留時間を推定することが可能となる（山本，1983）。

今回おこなった地下水の水素・酸素同位体分析結果から，地下水の起源および滞留時間に関して，以下の知見が得られた。

(1)　地下水の起源

図－8に地表水および地下水の$\delta D-\delta^{18}O$図を示す。図中の$\delta D=8\delta^{18}O+10$の直線はCraig（1961）により，世界各地の降水や各種地表水のδDおよび$\delta^{18}O$を分析して得られたものである。松葉谷（1985）によると，日本の天水は，図中の$\delta D=8\delta^{18}O+26$と$\delta D=8\delta^{18}O+10$の直線の間で，$\delta D$が－40～－100 ‰の範囲にほぼ入る。ちなみに，釜石の南方約30Kmに位置する綾里において分析された降水のδDおよび$\delta^{18}O$の間には$\delta D=8\delta^{18}O+13.59$ の関係がある（IAEA，1936）。今回分析を行った地下水は，松葉谷（1985）による日本の天水の範囲にほぼプロットされていることから，地下水は降水起源であると推定される。

図－8に示された地下水のうちKH-1孔の地下水には$\delta D=-75$ ～-80 ‰，$\delta^{18}O=-11$ ～-12 ‰で，地表水の$\delta D=-60$ ～-66 ‰，$\delta^{18}O=-9$～-10 ‰に比べて，δDについて約15‰，$\delta^{18}O$で約2‰低いものが存在する。このことは，KH-1孔の地下水には，現在とは気候条件の異なる（現在よりも寒冷な気候条件）古い時代の降水に由来するものか，現在と同じ気候条件の時の降水或いは現在の降水であれば，地表水が採水された場所よりもより標高の高い所で涵養した降水に由来することが示唆される。

(2)　地下水の滞留時間

図－9に地表水および地下水中のトリチウム濃度と深度との関係を示す。地下水中のトリチウム濃度と深度との間には顕著な相関は認められず，むしろ採水場所に起因するように見える。地表水，坑道湧水およびKG-1孔の地下水ではトリチウムが検出されるため，滞留時間は古くとも40年程度であると推定される。一方，KH-1孔の地下水にはトリチウム濃度が1T.U.以下で，トリチウムがほとんど検出されないものが存在することから，KH-1孔の地下水は，滞留時間が少なくとも40年程度以上であると推定される。

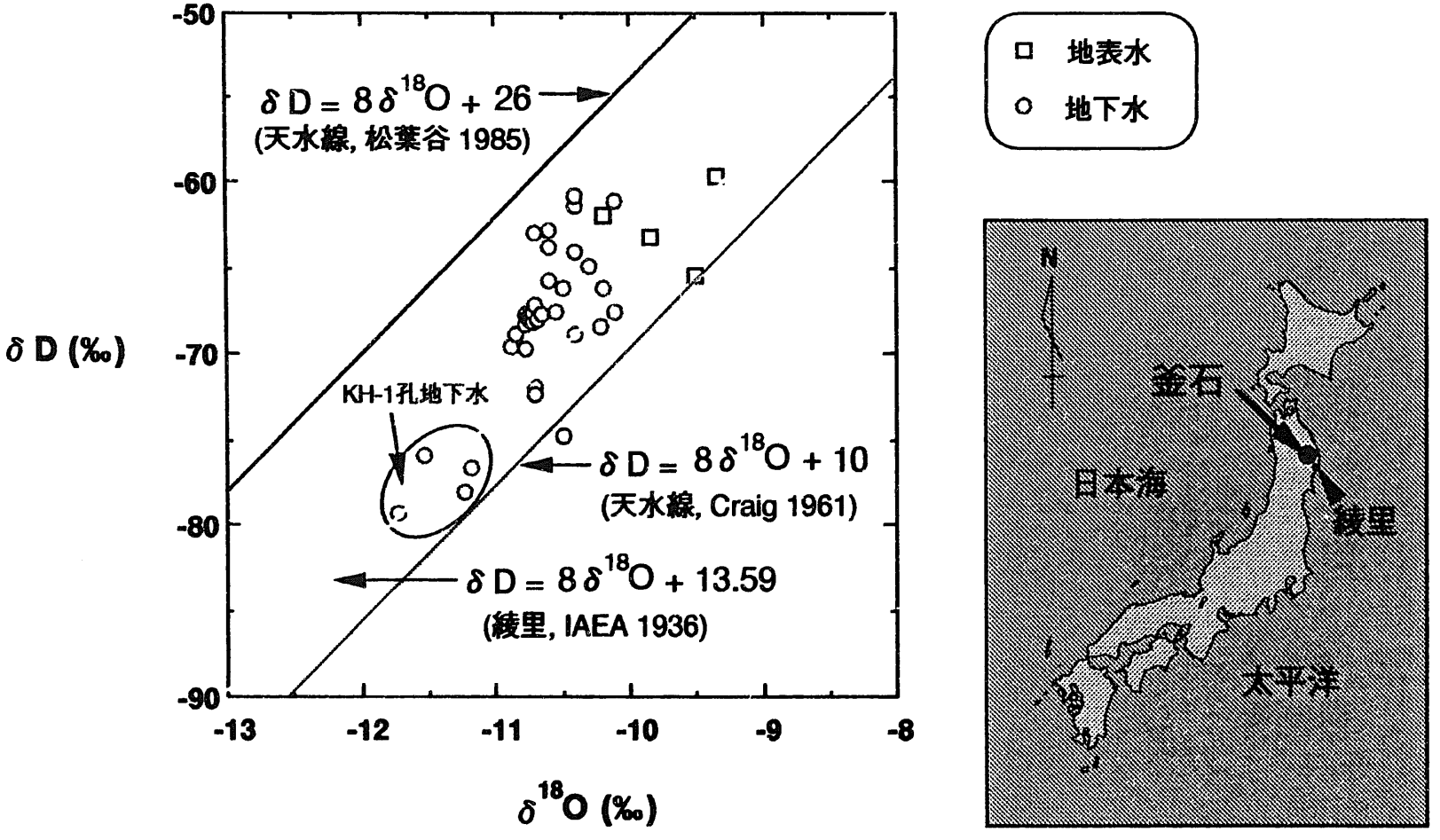


図-8　地表水および地下水のδD - δ18O 図

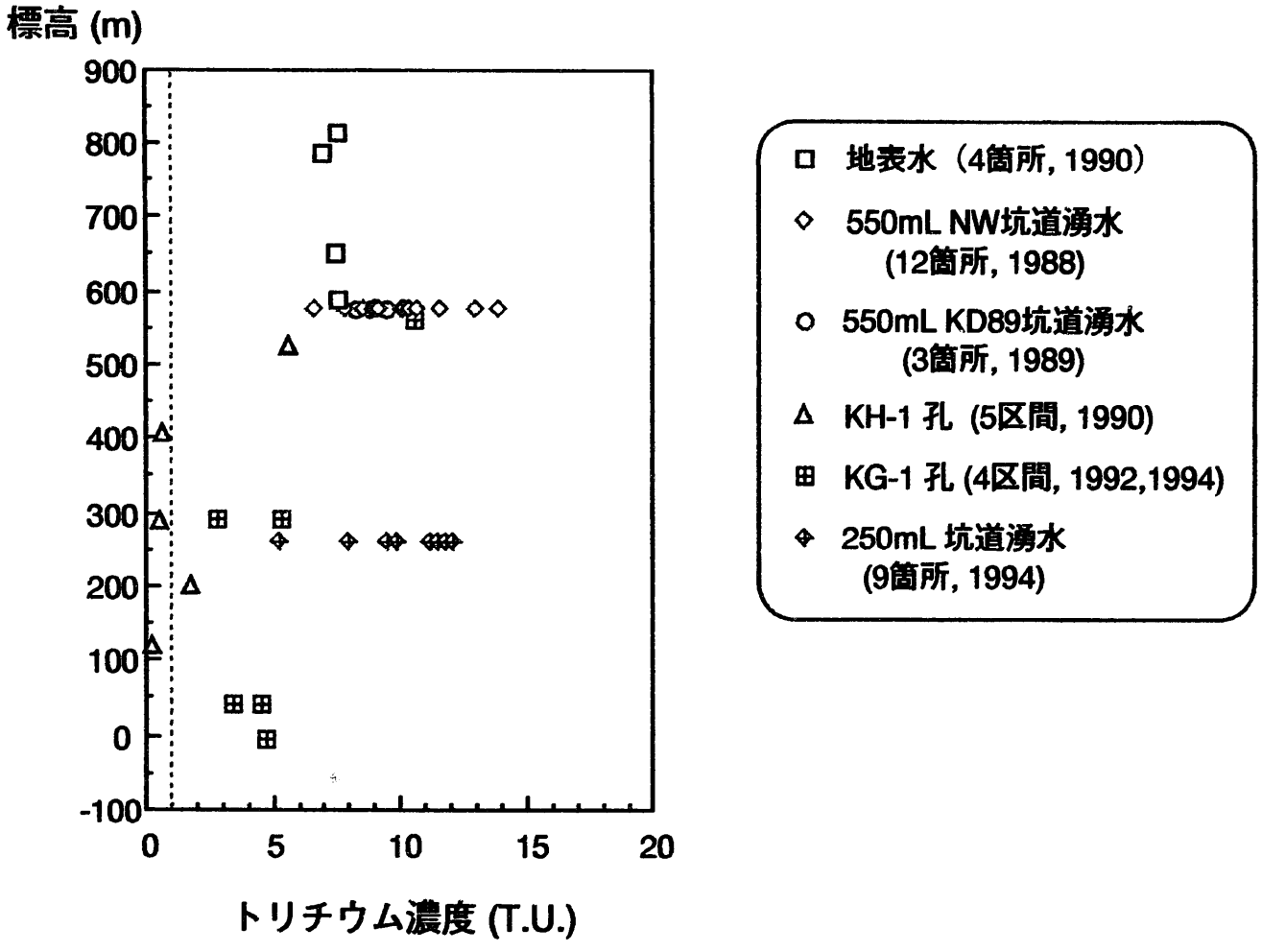


図-9　地表水および地下水のトリチウム濃度と深度との関係

2．3．2　地下水の水質

(1) 深度方向でのpH・イオン濃度等の変化

表－5.1 ～5.3 に示す地表水，坑道湧水，KH-1孔およびKG-1孔の地下水について，各々の試料が採取された標高をもとに，深度方向でのpH・イオン濃度の変化の様子を調べた。

図－10に地表水および栗橋花崗閃緑岩中の地下水の電気伝導度（EC）および蒸発残留物量と深度の関係を示す。蒸発残留物量は，地下水中の主要成分であるNa^+，K^+，Ca^{2+}，Mg^{2+}，Cl^-，SO_4^{2-}，HCO_3^-，SiO_2の8成分の和である。また図－11～13には，深度方向でのpHおよび各イオン濃度（SiO_2，Na^+，Ca^{2+}，$HCO_3^- + CO_3^{2-}$，SO_4^{2-}）の変化の様子を示す。以下に深度方向でのEC，蒸発残留物量（dissolved solid），pHおよび各イオン濃度の変化の様子について記す。

① EC（図－10）
- ECは深度が増すと増加する（20μS/cm⇨130μS/cm程度）傾向が認められる。

② 蒸発残留物量（図－10）
- 蒸発残留物量は，深度が増すと増加する（25mg/l⇨100mg/l 程度）傾向が認められる。

③ pH（図－11）
- pHは深度とともに弱酸性－中性（pH＝5.3-7.4 ）から弱アルカリ性（pH＝10.5）へと変化する傾向が認められる。

④ SiO_2（図－11）
- SiO_2濃度は，深度が増すと増加する（SiO_2＝10ppm⇨27ppm程度）傾向が認められる。

⑤ Na^+（図－12）
- Na^+ 濃度は，深度が増すと増加する（Na^+ ＝3 ppm⇨20ppm程度）傾向が認められる。

⑥ Ca^{2+}（図－12）
- 深度とともに増加する傾向は特に認められない。
- 550mレベル坑道の地下水のCa^{2+}濃度は，250mレベル坑道およびそれ以深の地下水のCa^{2+}濃度よりも，やや高い傾向が認められる。

⑦ $HCO_3^- + CO_3^{2-}$（図－13）
- 深度とともにやや増加する傾向が認められる。
- 550mレベル坑道の地下水の炭酸濃度（$HCO_3^- + CO_3^{2-}$）は，250mレベル坑道およびそれ以深の地下水の炭酸濃度よりも，やや高い傾向が認められる。これは，Ca^{2+}濃度と同じ傾向である。

⑧ SO_4^{2-}（図－13）
- 深度に依存する顕著な傾向は認められず550mレベル坑道の地下水のSO_4^{2-} 濃度と，それ以深の地下水のSO_4^{2-} 濃度を比べても顕著な差は認められない。

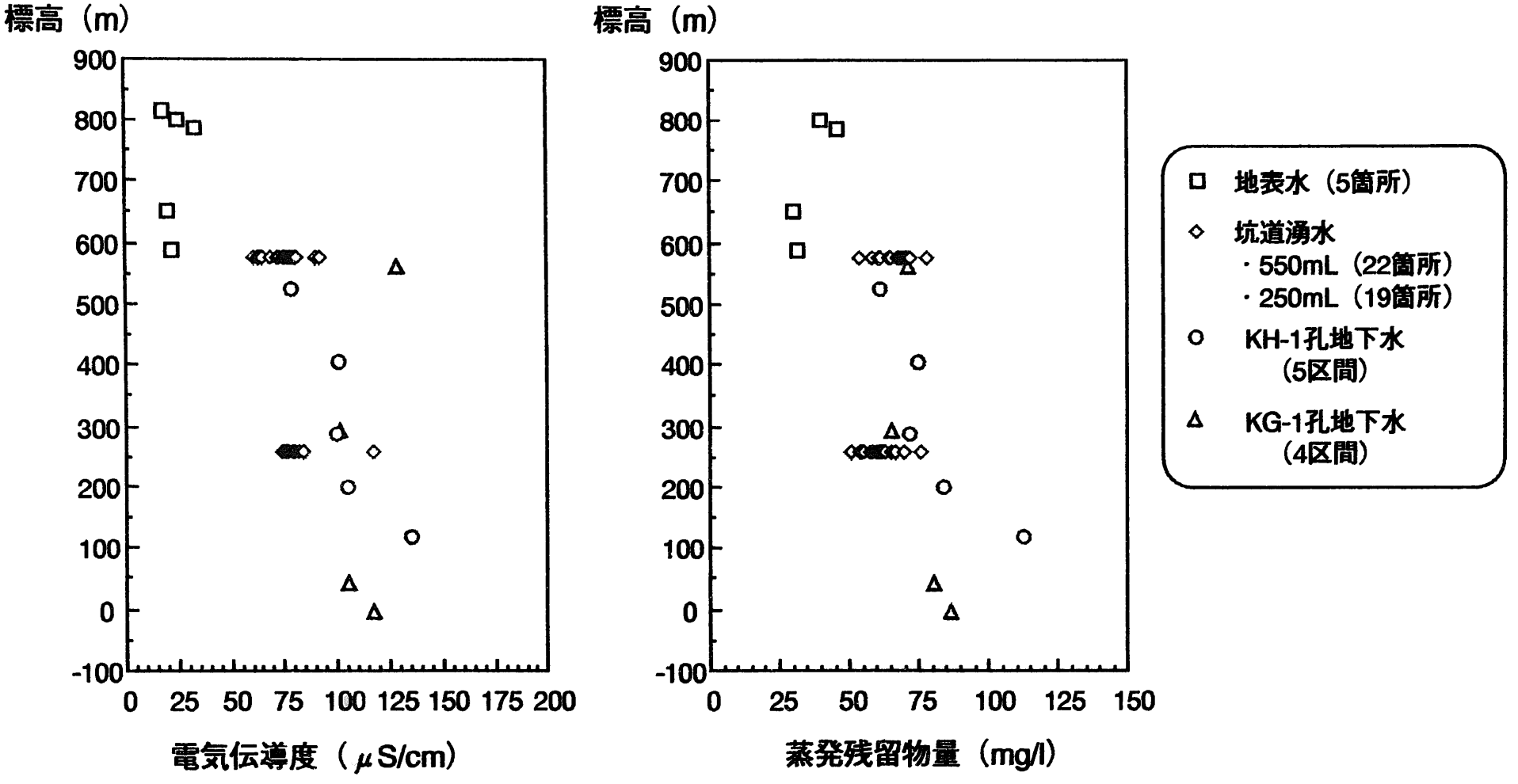


図-10　地表水および地下水の電気伝導度，蒸発残留物量と深度の関係

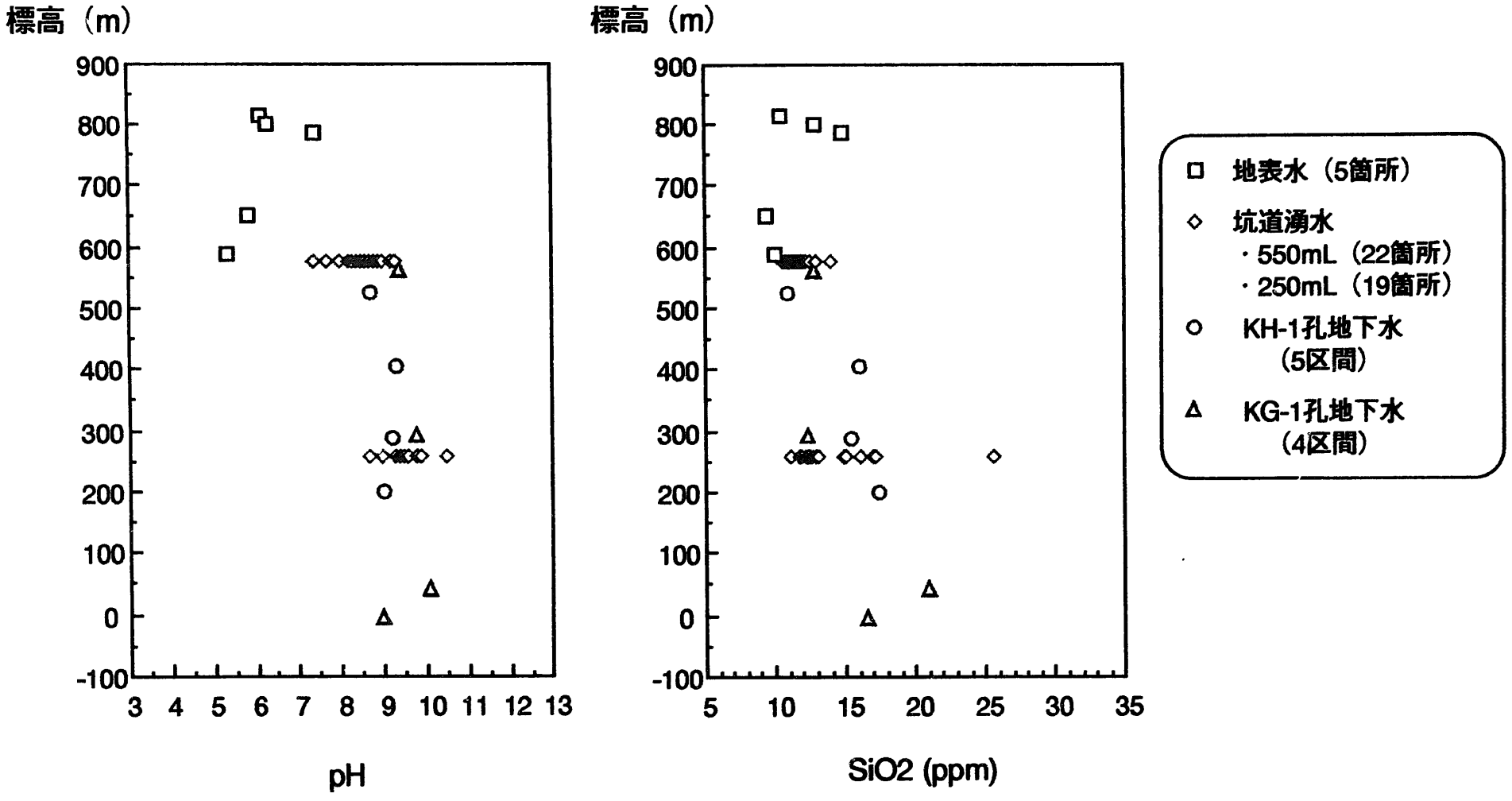


図-11　地表水および地下水のpH，SiO2濃度と深度の関係

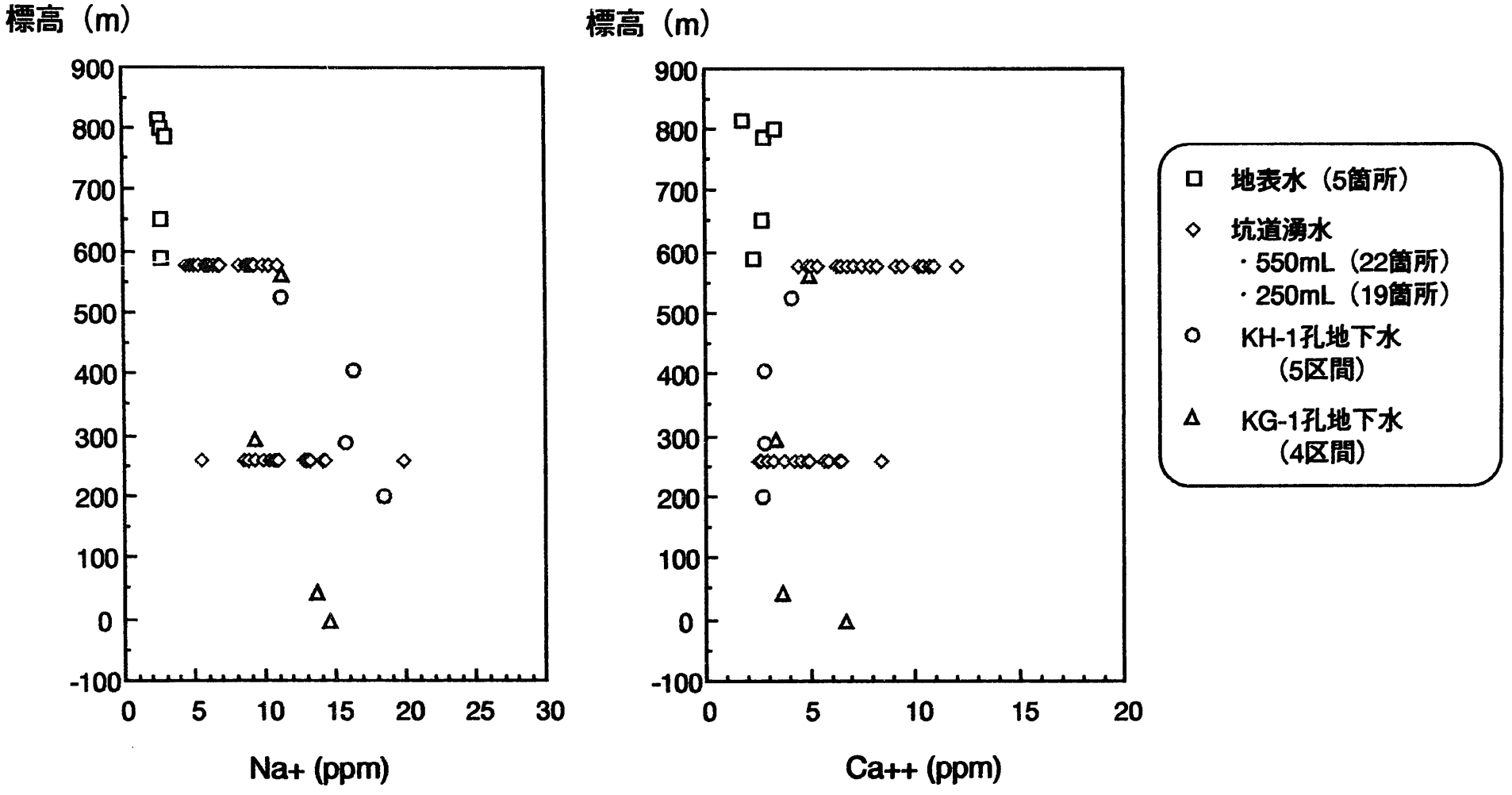


図-12　地表水および地下水のNa+, Ca++濃度と深度との関係

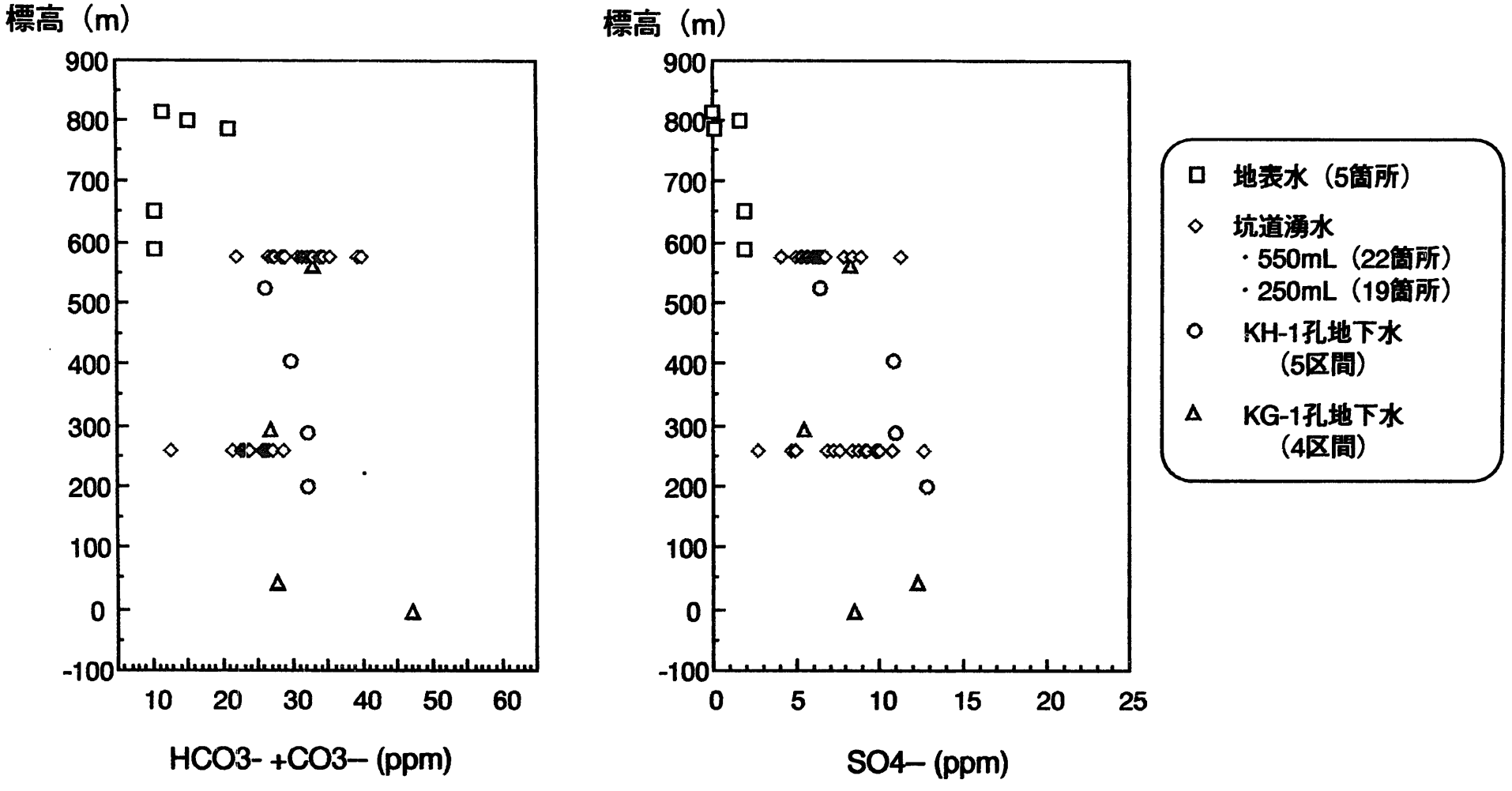


図-13　地表水および地下水の炭酸濃度，硫酸濃度と深度との関係

(2) 深度方向での水質タイプの変化

表－5.1 ～5.3 に示す地表水，坑道湧水，KH-1孔およびKG-1孔の地下水について水質のタイプ分類を試みるため，各々の試料に対してNa^+，K^+，Ca^{2+}，Mg^{2+}，炭酸（HCO_3^- ＋ CO_3^{2-}），SO_4^{2-}，Cl^- の当量数を求め，Piper のキーダイヤグラムにプロットした。図－14に地表水および地下水の化学組成のキーダイヤグラムを示す。なおキーダイヤグラムへのプロットにあたって，坑道湧水やKH-1孔地下水の様に同一箇所において複数回の水質分析を行っているものについては，平均値を算出してプロットした。

図－14のキーダイヤグラムから，水質のタイプは$Ca-HCO_3$型および$Na-HCO_3$型の２つのタイプに大別される。このうち$Ca-HCO_3$型は，地表水と主に550mレベルNW坑道の湧水である。一方，$Na-HCO_3$型は，550mレベル坑道湧水の一部と250mレベル坑道湧水，KH-1孔およびKG-1孔の地下水であり，ほとんどが$Ca-HCO_3$型よりも深いところで採取された地下水である。これらのことから，比較的浅部の地下水は$Ca-HCO_3$型であるが，より深部になると地下水は$Na-HCO_3$型になるような深度方向での水質タイプの変化傾向が認められる。

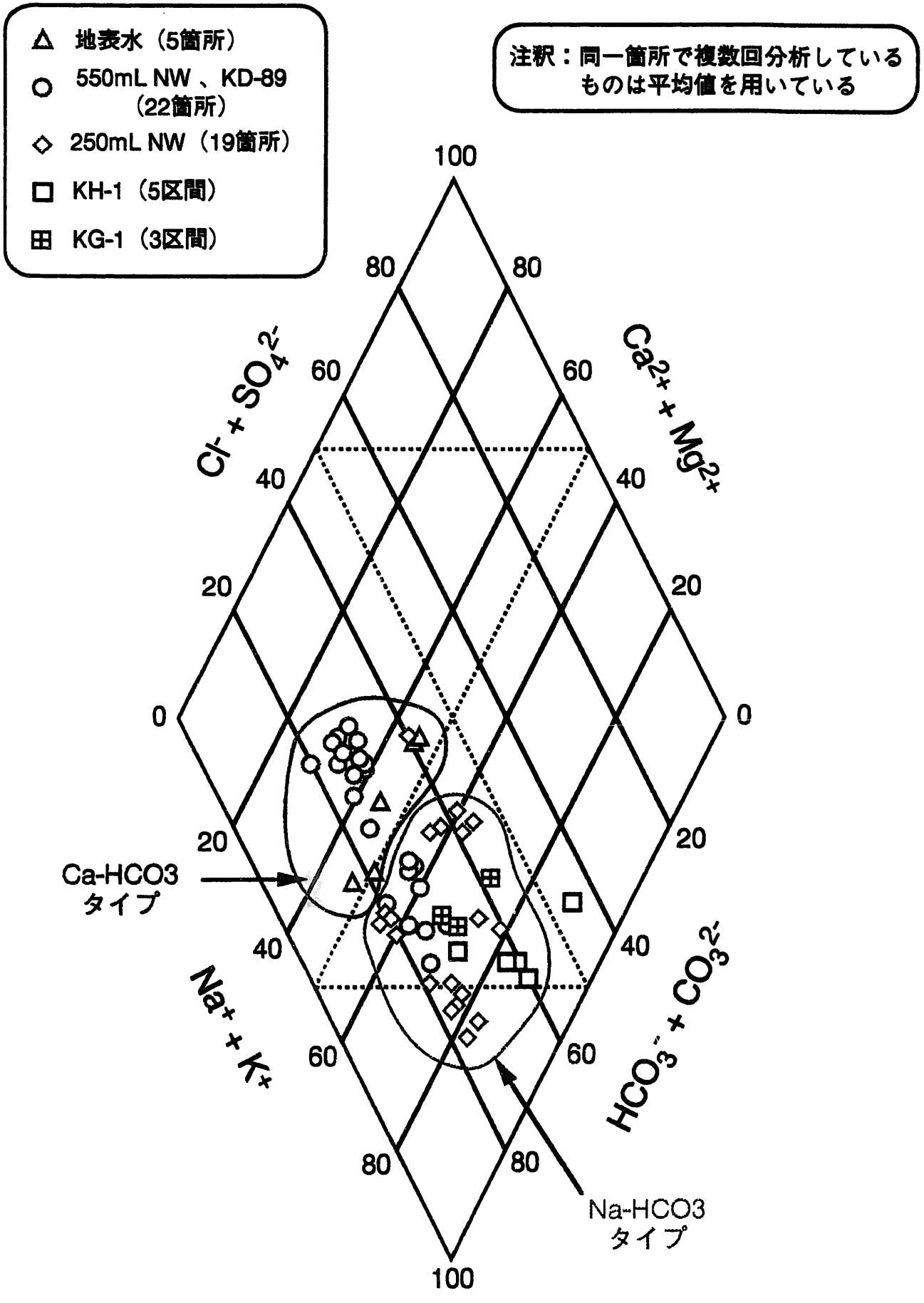


図-14　地表水および地下水の化学組成のキーダイヤグラム

3．水質形成機構に関する予察的考察

3．1　KG-1孔の地下水の酸化還元状態

地下深部の地下水の物理化学パラメータを測定する方法としては，例えば，次の様な方法が挙げられる。

・原位置で測定
・原位置から地下水を連続採水し，フローセルのモニタリング装置等で測定
・原位置から採水した地下水を不活性雰囲気下（グローブバック等使用）で測定
・原位置から採水した地下水を大気下で測定

地下深部の地下水の物理化学パラメータを測定する場合，原位置から地下水を採水し測定する間に圧力の変化（減圧）や大気との接触が考えられるため，測定に際しては原位置で測定するのが望ましい（Wikberg, 1987）。特に地下水の酸化還元電位（Eh）については例えばLaaksoharju et al.（1993）によるフィンランドの例で示されている様に，原位置で推定される値（還元性）と地表で測定された値（酸化性）での違いが顕著である（図－15）。

KG-1孔の地下水の物理化学パラメータの測定は，地表に汲み上げられた地下水試料をArガスで置換したグローブバック中で行ったものである。表－6に示すように地下水のEhはいずれの区間においても＋350mV 程度と酸化性の値を示したが，Laaksoharju らの例にも示されているように，地表で測定した値は必ずしも原位置で推定される地下水の酸化還元状態を反映しているとは限らない可能性がある。

地下水の酸化還元状態はEhを直接測定する他に，間接的に微生物の存在種から酸化還元状態を推定することも可能である。微生物の活動は微生物の生息する環境（深度，水温，pH，Eh，有機物濃度など）により影響される。例えば図－16に示すように，Jorgensen et al.（1980）により，水界堆積物中の深度方向で進行する微生物過程の違いが報じられている。図－16に示されているように一般に嫌気的状態における有機物の分解は，脱窒（硝酸塩還元）⇨硫酸塩還元⇨メタン生成の順に生ずると考えられている。このことは，例えば脱窒細菌による硝酸塩還元反応が活発に生じている時には，その他の反応（硫酸塩還元など）が活発になる（硫酸塩還元細菌が極度に増殖している）ことは無いことを意味している。また上記の微生物過程の進行（脱窒⇨硫酸塩還元⇨メタン生成）に対応して，酸化還元状態は酸化的⇨還元的へと変遷する。

KG-1-3（標高約37～43m)における微生物分析結果（表－6）からは，地下水中の主な微生物としては硝酸塩還元細菌や脱窒細菌が確認され，微生物過程としては硝酸塩還元過程にあると推定される。一方，KG-1-2（標高約289 ～295m）における微生物分析結果（表－6）からは，地下水中の主な微生物としては硫酸塩還元細菌が確認され，微生物過程としては硫酸塩還元過程にあると推定される。KG-1-2およびKG-1-3のいずれについても，測定された地下水のEhは同程度（＋350mV 程度）であるが，微生物の存在種から推定される地下水の酸化還元状態としては，KG-1-2の方が，より還元的であると考えられる。

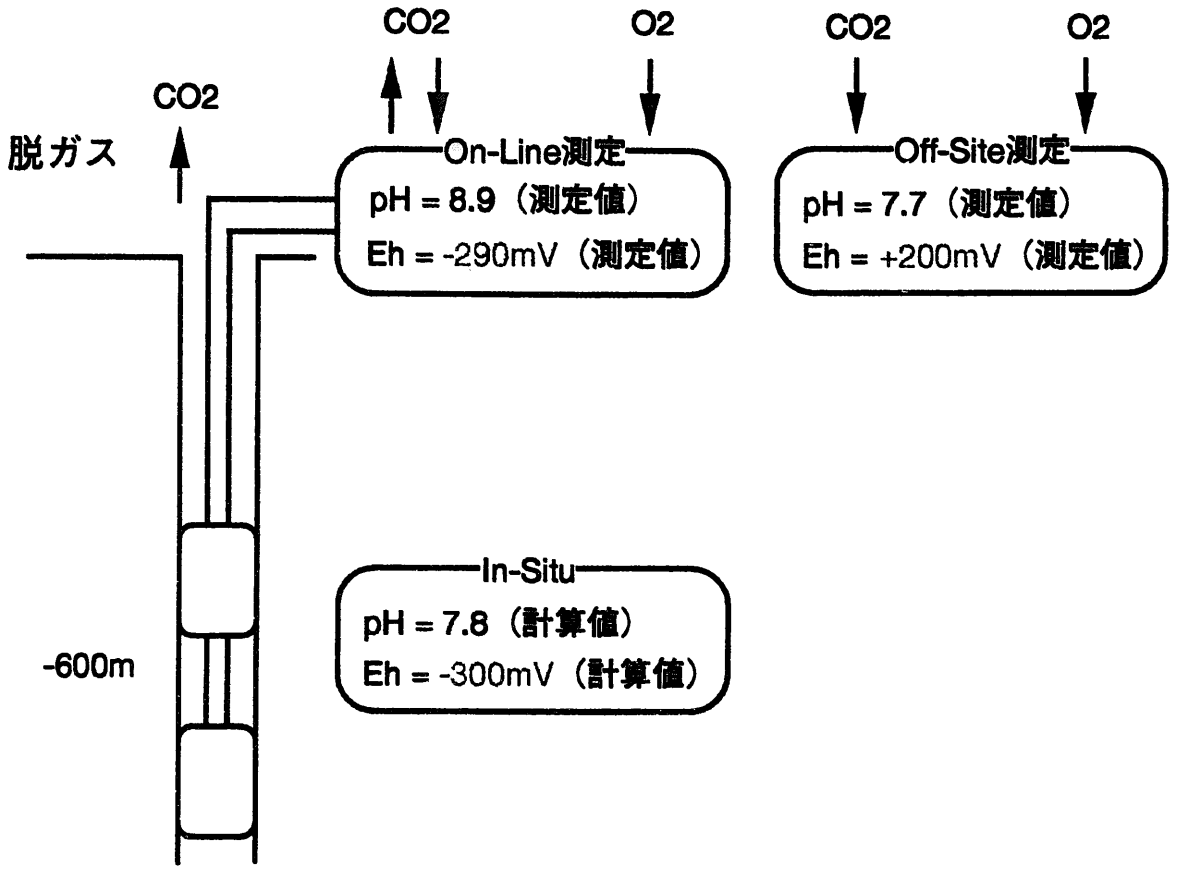


図-15　原位置（計算値）と地表（測定値）でのpH, Ehの値
(Laaksoharju et al., 1993)

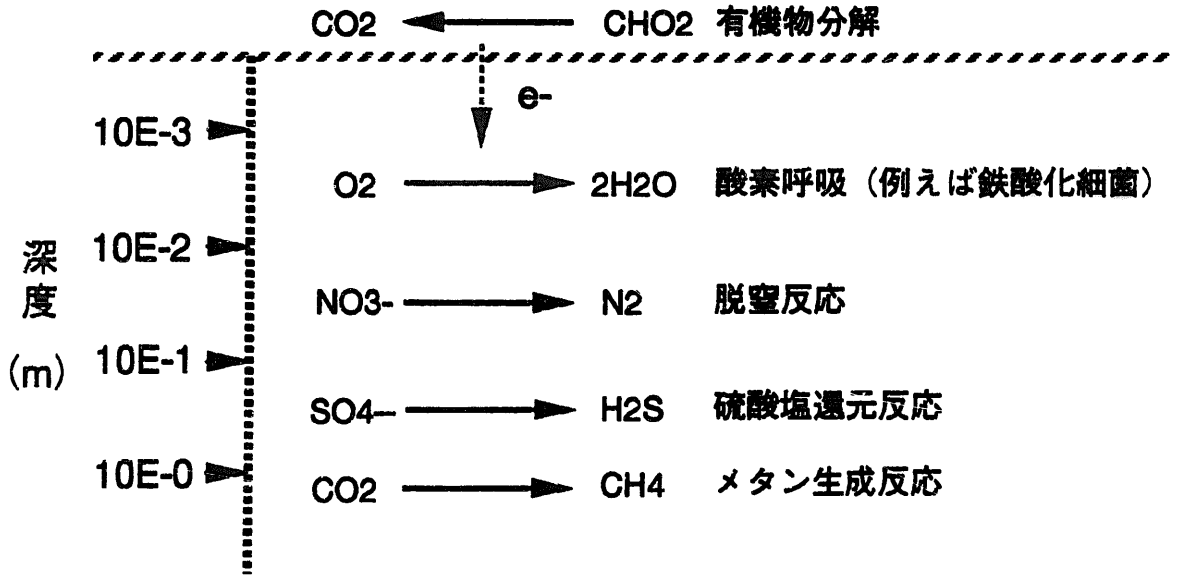


図-16　水界堆積物中で進行する微生物過程の深度による相違
(Jorgensen, 1980)

KG-1-2の地下水の酸化還元電位に関しては，HGP-10の原位置センサー（作用電極はAu電極，参照電極はAg・AgCl電極）により測定されており（1992年12月11日），Eh＝-176mVの値が得られている（表－5.1）。しかしながら地下水の酸化還元電位は，測定に伴う様々な因子（共存イオン種，測定時間等）による影響を受ける可能性が高いと考えられ，信頼性の高い測定値を取得するのは非常に難しい。そこで地下水中の主な微生物として硫酸塩還元細菌が確認されたKG-1-2の地下水のEhに関して，微生物の活性領域図をもとに推定する。Fukunaga et al.（1995）は，深部地質環境下での硫酸塩還元細菌生息の適応性を把握するため，環境因子としてpHおよびEhをパラメータとした試験を行い，pHおよびEhに関しての硫酸塩還元細菌の活性領域図を作成している（図－17）。Fukunagaらの試験で用いられた硫酸塩還元細菌は，KG-1-2で確認された Desulfovibrio属である。Fukunagaらの試験は35℃の場合であり実際の地下水温（約13℃）とは異なるが，この程度の温度差であれば硫酸塩還元細菌の活性に与える影響は小さいと仮定し，図－17をもとにKG-1-2の地下水のpH（＝9.8)での硫酸塩還元細菌の活性を示すEhを推定すると，Eh＝-300～-400mV程度となる。原位置でのEh測定結果は，硫酸塩還元細菌の活性領域図から推定されるEhほど低くはないが，活性領域図から推定される結果と，KG-1-2の地下水が還元性であるという点で調和的である。したがって，KG-1-2の地下水が還元性であることは，原位置でのEh測定結果および地下水中での微生物活性の両者の観点から支持されると言える。

3．2　地下水のpH，主要なイオン（Na^+，Ca^{2+}，HCO_3^-）およびSiO_2濃度を支配する鉱物－水反応

地下水の化学的特性（pH，Ehおよびイオン濃度）を規制する主要な要因としては，地下水の起源とそれまでに接した鉱物との反応が挙げられる。循環水の場合，降水起源の地下水が主であるが，海水起源のものもあり，これらの起源の異なる地下水の混合等も地下水の化学的特性を規制する要因として挙げられる。地下水の起源が降水の場合，降水は天然の蒸留作用によって生じたものであり溶存成分が少ないので，地下水中の主なイオンの起源は降水と反応した鉱物であると考えられる。従って，降水起源である栗橋花崗閃緑岩中の地下水についても，地下水中の主なイオンの起源を考察する場合，栗橋花崗閃緑岩の構成鉱物を把握することが重要である。また，栗橋花崗閃緑岩の様な結晶質岩の場合，地下水は主に割れ目の中を流動していると考えられるため，割れ目の充填鉱物を把握することも重要である。

ここでは栗橋花崗閃緑岩中の地下水のpH，地下水中に溶存する主要イオンであるNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^-およびSiO_2濃度を支配すると考えられる鉱物－水反応に関して，栗橋花崗閃緑岩の母岩・変質ハロー部分・割れ目充填部の構成鉱物データおよび地下水水質データをもとに考察する。

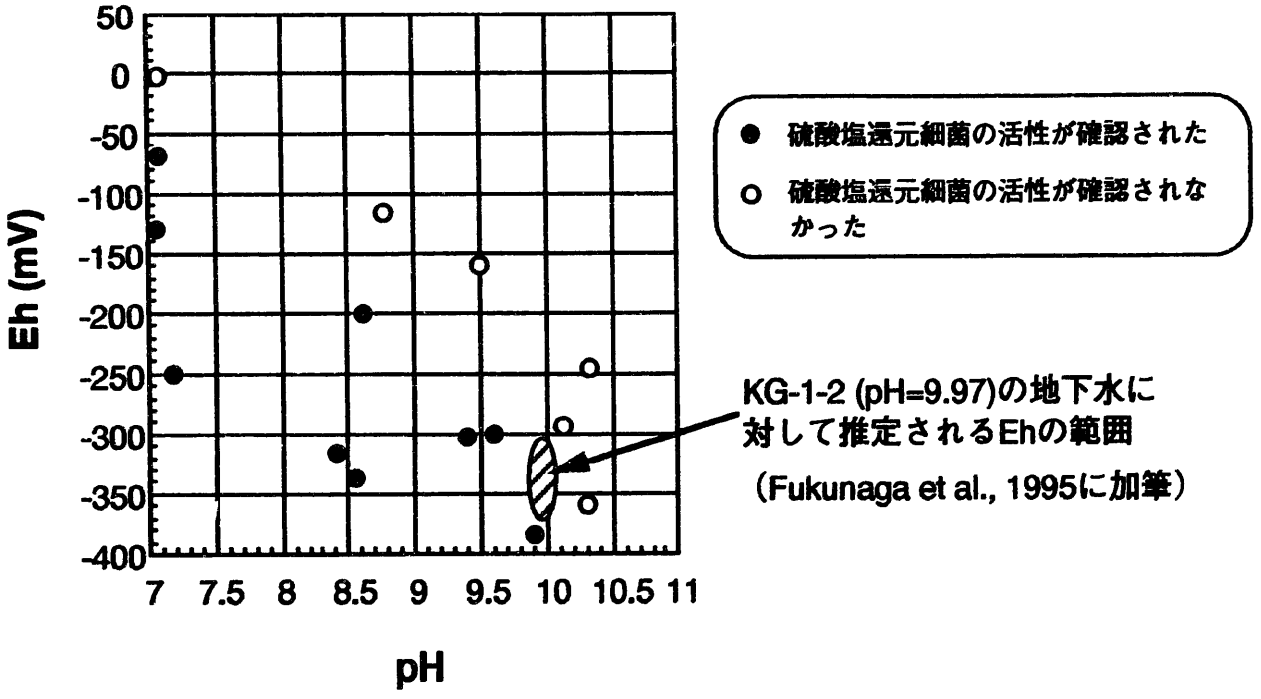


図-17　硫酸塩還元細菌の耐性領域図 (35℃)
(Fukunaga et al., 1995)

(1) 岩石・鉱物データからの検討

2．2項に記されている岩石・鉱物データをもとに，地下水のpH，主要なイオンであるNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^- およびSiO_2の起源について考察する。

栗橋花崗閃緑岩の母岩・変質ハロー部分・割れ目充填部の構成鉱物のうちNa^+ やCa^{2+}を主成分とし，比較的多量に存在する鉱物は，方解石および斜長石である。この他に存在量としては少ないがNa^+ やCa^{2+}を主成分とする鉱物は，沸石類および粘土鉱物である。これらのNa^+ やCa^{2+}を含む鉱物と水との反応により，地下水中のNa^+ やCa^{2+}が変化すると考えられる。また炭酸を含む方解石と水との反応により，地下水中のHCO_3^- 濃度が変化すると考えられる。

一方，上記の構成鉱物のうちSiO_2を含み，比較的多量に存在する鉱物は，石英および斜長石である。この他に地下水中のSiO_2の供給源になると考えられる鉱物は，アルミノ珪酸塩である雲母，沸石類，粘土鉱物である。これらのSiO_2を含む鉱物と水との反応により，地下水中のSiO_2濃度が変化すると考えられる。

(2) 相平衡図による検討

地下水中のNa^+ やCa^{2+}の供給源として，構成鉱物中で比較的多量に存在し，風化に対して不安定な鉱物である斜長石を想定し，斜長石の相平衡図を用いて地下水中のNa^+ やCa^{2+}の変化に関与する反応を検討した。相平衡図は，Stumm et al.（1981）による各鉱物の平衡定数（表－7）を用いて作成した。図－18に地表水および地下水の水質データを斜長石の相平衡図にプロットした結果を示す。アルバイトとその風化生成物との間の相平衡図を見ると，地表水および$Ca-HCO_3$型の地下水はカオリナイトの安定領域にプロットされ，$Na-HCO_3$型の地下水はカオリナイト～アルバイトの安定領域にプロットされる。一方，アノーサイトとその風化生成物との間の相平衡図を見ると，地表水および$Ca-HCO_3$型の地下水はカオリナイトの安定領域にプロットされ，$Na-HCO_3$型の地下水はカオリナイト～アノーサイトの安定領域にプロットされる。深度方向で考えた場合，浅部の地下水は風化生成物としてカオリナイトが安定な領域にプロットされ，より深部の地下水になるとアルバイトおよびアノーサイト自体が安定な領域にプロットされると言い換えることができる。従って，この様な深度方向での地下水中のNa^+ やCa^{2+}の変化は，アルバイトおよびアノーサイトがカオリナイトに変化する以下の反応が支配的であると推定される。

$NaAlSi_3O_{8(s)} + H^+ + 4.5H_2O \Rightarrow Na^+ + 0.5Al_2Si_2O_5(OH)_{4(s)} + 2Si(OH)_{4(aq)}$

（アルバイト）　　（カオリナイト）

$CaAl_2Si_2O_{8(s)} + 2H^+ + H_2O \Rightarrow Ca^{2+} + Al_2Si_2O_5(OH)_{4(s)}$

（アノーサイト）　　（カオリナイト）

また深度の増加とともに地下水のpHが上昇する傾向に関しては，上記の斜長石の風化反応に伴い溶液中のH^+ が消費されていくことからもわかる。

表-7　相平衡図の作成に用いた鉱物の平衡定数 (Stumm et al., 1981)

	Log K at 25°C, 1 atm
(1) Na feldspar(s) + H^+ + $4\frac{1}{2}H_2O$ = $\frac{1}{2}$ kaolinite(s) + $2H_4SiO_4$ + Na^+	−1.9
(2) 3 Na montmorillonite(s) + H^+ + $11\frac{1}{2}H_2O$ = $3\frac{1}{2}$ kaolinite(s) + $4H_4SiO_4$ + Na^+	−9.1
(3) Ca feldspar(s) + $2H^+$ + H_2O = kaolinite(s) + Ca^{2+}	+14.4
(4) 3 Ca montmorillonite(s) + $2H^+$ + $23H_2O$ = 7 kaolinite(s) + $8H_4SiO_4$ + Ca^{2+}	−15.4
(5) Kaolinite(s) + $5H_2O$ = 2 gibbsite(s) + $2H_4SiO_4$	−9.4[b]
(6) SiO_2(amorph) + $2H_2O$ = H_4SiO_4	−2.7
(7) $CaCO_3$(s) (calcite) = Ca^{2+} + CO_3^{2-}	−8.3
(8) HCO_3^- = H^+ + CO_3^{2-}	−10.3
(9) CO_2(g) + H_2O = H^+ + HCO_3^-	−7.8
(10) CO_2(g) + H_2O = $H_2CO_3^*$	−1.5

[a] Ca feldspar (Anorthite) = $CaAl_2Si_2O_8$; Na feldspar (Albite) = $NaAlSi_3O_8$;
Na montmorillonite = $Na_{0.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$; Ca montmorillonite = $Ca_{0.33}Al_{4.67}Si_{7.33}O_{20}(OH)_4$;
Kaolinite = $Al_2Si_2O_5(OH)_4$; Gibbsite = $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$; $H_2CO_3^* = CO_2(aq) + H_2CO_3$.
[b] Cf. R. M. Garrels, *Amer. Mineralogist*, **42**, 789 (1957).

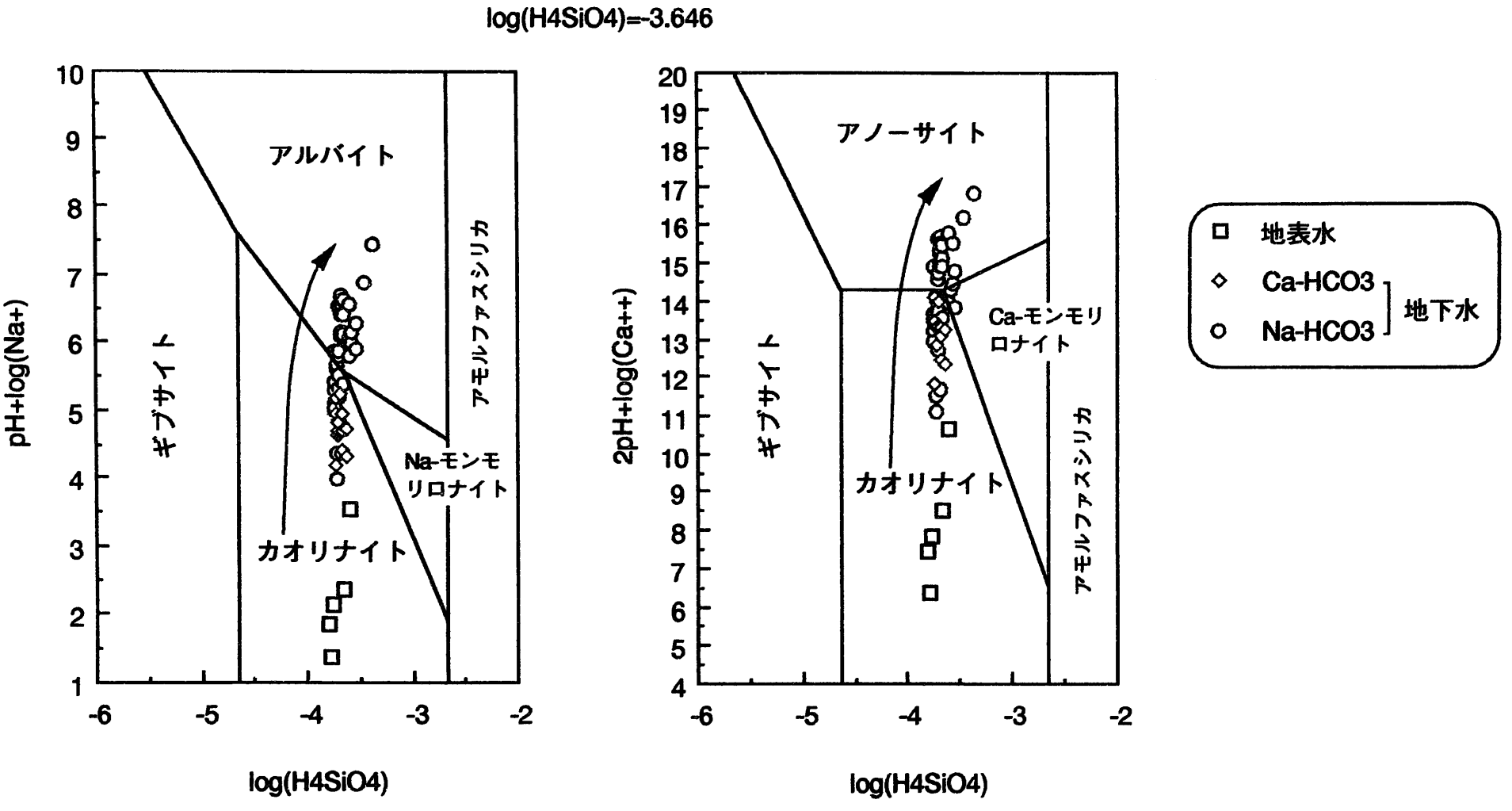


図-18　地表水および地下水と鉱物の相平衡図

(3) 熱力学的解析による検討

岩石・鉱物データから，地下水中の主要イオンであるNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^- およびSiO_2の供給源として考えられた鉱物のうち，実際に栗橋花崗閃緑岩中の地下水の水質形成（鉱物－水反応）に寄与していると考えられる鉱物を地球化学コードEQ3/6（Wolery, 1983）を用いて推定した。推定に際しては，栗橋花崗閃緑岩中の地下水に対して，地下水中のNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^- およびSiO_2の供給源として考えられる各鉱物の飽和指数（SI：Saturation Index）を求めた。また，各鉱物の飽和指数の値をもとに，栗橋花崗閃緑岩中の地下水に対して飽和（平衡）状態にあると推定される鉱物を抽出した。EQ3/6 に入力した水質データは表5-1 ～5-3 に示す水質分析結果のうち，平成５年度に採水・分析した250mレベル坑道壁面および550mレベル坑道壁面からの湧水の一部である。なお，EQ3/6 による地球化学計算を行なう際に使用した熱力学データは，EQ3/6 ソフトウェアパッケージで用意されているデータファイル（DATA0. 3245R54）にまとめられているデータである。

図－19～21にEQ3/6 により計算された栗橋花崗閃緑岩中の地下水に対する各鉱物のSIをpHを横軸にとってまとめたものを示す。

ここでSI（飽和指数）の定義について Nordstrom et al.(1994) を参考に略述する。SIは以下のようにして求められる。

$$SI\ (飽和指数) = \log(IAP/Ksp)$$

ここでIAP(Ion Activity Product) は，ある状態での溶液中に存在するイオンの活量の積を表す。Ksp(Solubility Product) は，ある反応が平衡状態にある時の溶液中に存在するイオンの活量の積を表す。

例えば，ある水溶液に対する方解石の飽和関係を調べるため，方解石の溶解反応として以下の反応式を考える。

$$CaCO_{3\,(s)} = Ca^{2+} + CO_3^{2-}$$

この反応のKsp は，

$$Ksp = (a\,Ca^{2+} \cdot a\,CO_3^{2-})_{equilibrium} / a\,CaCO_3$$

ここで考える方解石はpureな固相であるので，$a\,CaCO_3 \fallingdotseq 1$ と仮定する。

ある溶液中に存在するCa^{2+}およびCO_3^{2-} の活量の積（IAP)を，

$$IAP = (a\,Ca^{2+} \cdot a\,CO_3^{2-})_{water}$$ として表すと

ある溶液に対する方解石の飽和状態は，

$$IAP/Ksp = (a\,Ca^{2+} \cdot a\,CO_3^{2-})_{water} / (a\,Ca^{2+} \cdot a\,CO_3^{2-})_{equilibrium}$$

として表せる。

仮に溶液に対して方解石が飽和（平衡）であれば，

$$(a\,Ca^{2+} \cdot a\,CO_3^{2-})_{water} = (a\,Ca^{2+} \cdot a\,CO_3^{2-})_{equilibrium}$$

であり，IAP/Ksp ＝１となる。従ってlog(IAP/Ksp)＝０が飽和の状態である。

また溶液に対して方解石が過飽和の場合は，

$$(a\,Ca^{2+} \cdot a\,CO_3^{2-})_{water} > (a\,Ca^{2+} \cdot a\,CO_3^{2-})_{equilibrium}$$

であり，IAP/Ksp ＞１となる。従ってlog(IAP/Ksp)＞０が過飽和の状態である。

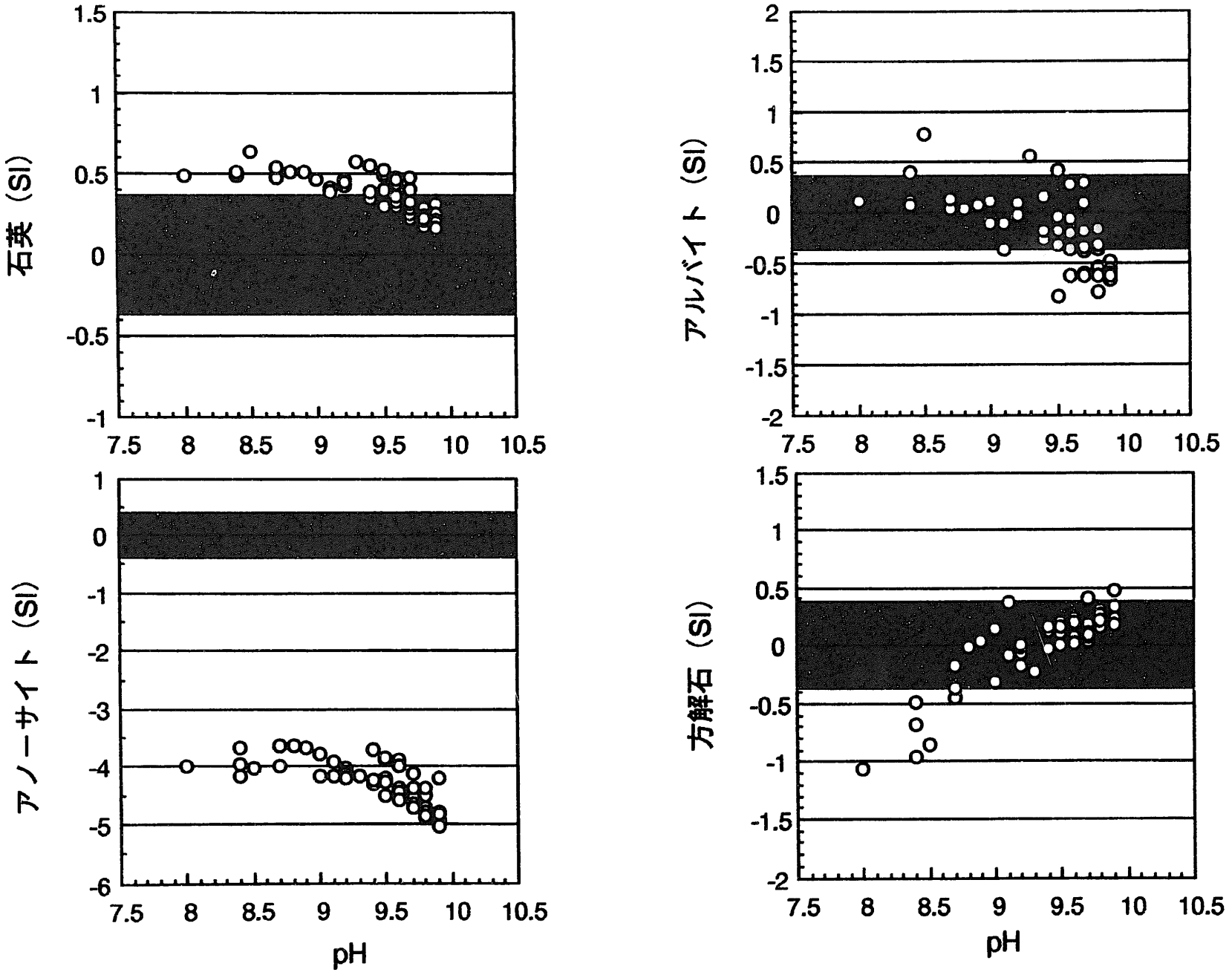


図-19　EQ3/6による釜石地下水に対する各鉱物の飽和指数計算結果（その1）

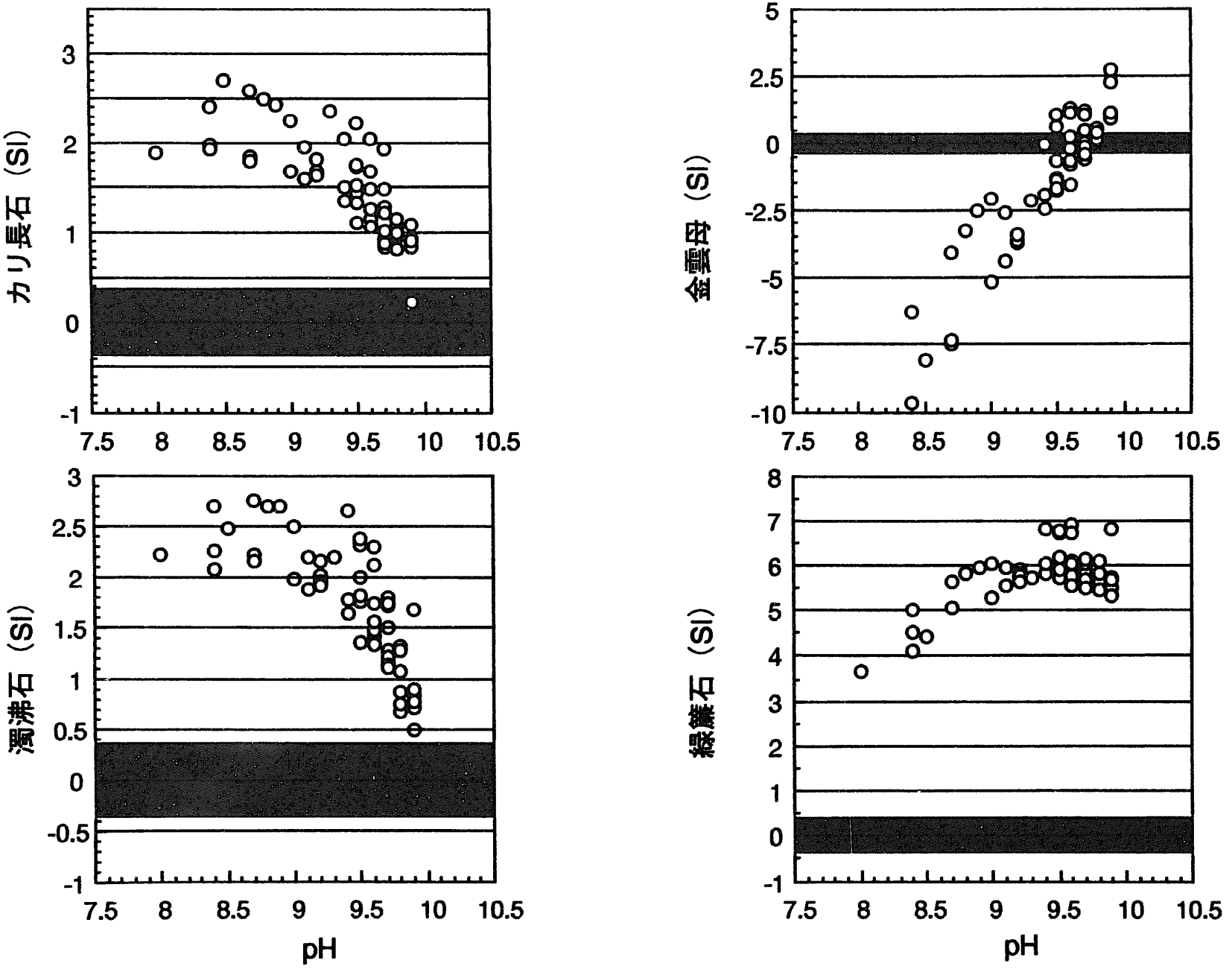


図-20　EQ3/6による釜石地下水に対する各鉱物の飽和指数計算結果（その2）

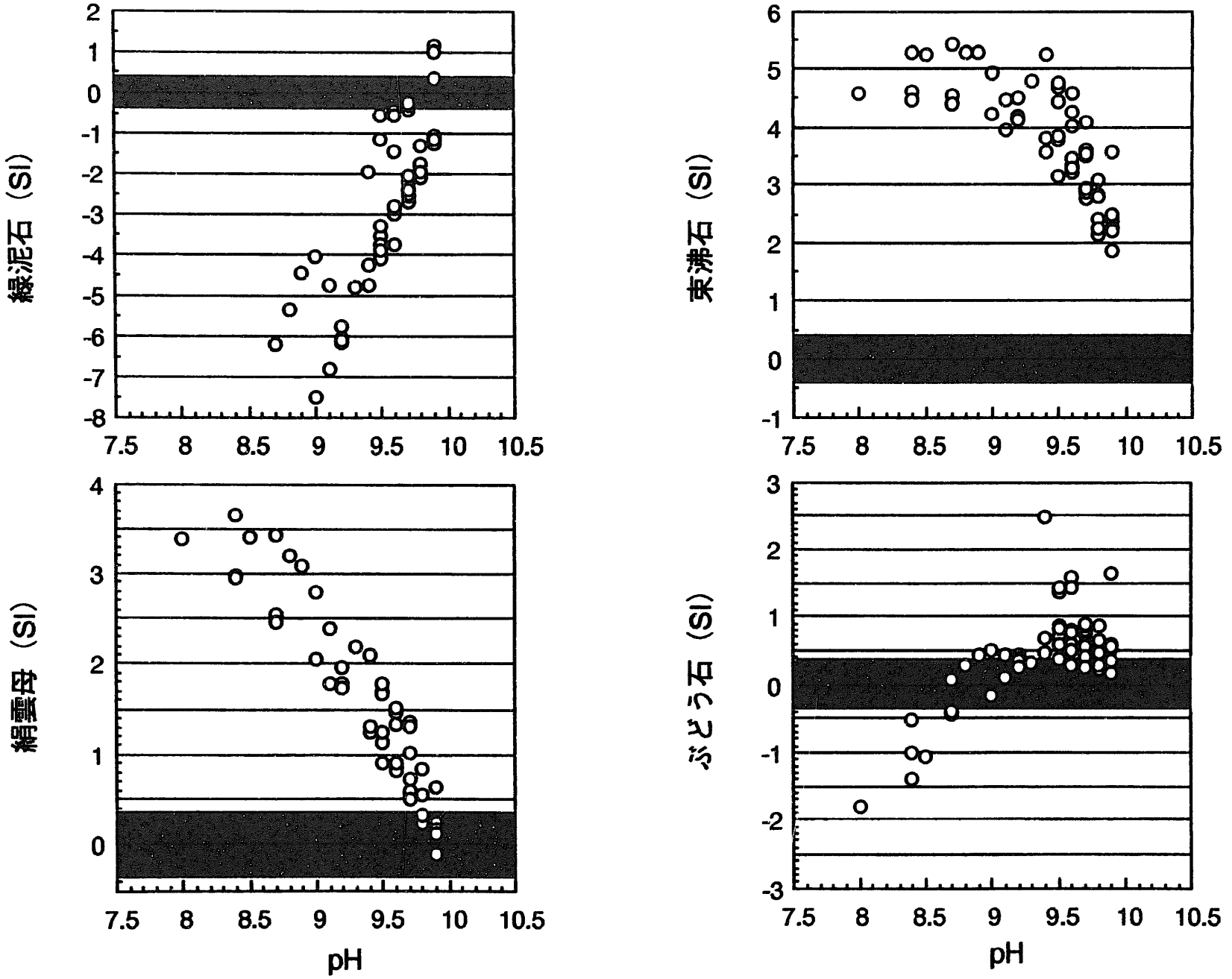


図-21　EQ3/6による釜石地下水に対する各鉱物の飽和指数計算結果（その3）

逆に溶液に対して方解石が不飽和の場合は,

$$(a Ca^{2+} \cdot a CO_3^{2-})_{water} < (a Ca^{2+} \cdot a CO_3^{2-})_{equilibrium}$$

であり, IAP/Ksp ＜1となる。従ってlog(IAP/Ksp)＜0が不飽和の状態である。

但しこの様なSIの定義は理想的なものであり, 例えばEQ3/6 による計算においては, 鉱物の飽和状態を推定する際の基準値として以下の値が推薦されている (Wolery, 1983)。

SIの絶対値＜0.37[1)]の場合 ⇨ 飽和 (平衡)

(-0.37＜SI＜0.37)

上記の関係をもとに図－19～21に示す各鉱物の飽和指数を調べた。図－19～21中の赤塗りの部分は, 地下水に対して飽和であるとみなした領域(-0.37＜SI＜0.37) である。なお実際に栗橋花崗閃緑岩の構成鉱物として認められる各鉱物の組成は, EQ3/6 のデータファイル (DATA0. 3245R54) 中の各鉱物の組成とは異なるものも含まれる。特に固溶体として表される鉱物に関しては, データファイル中の各鉱物の端成分について, 地下水との平衡関係を調べており, 実際に栗橋花崗閃緑岩の構成鉱物として認められる鉱物とは組成上異なると考えられる。以下に飽和指数計算結果から推定される各鉱物の地下水に対する飽和状態についてまとめる。

① 石英 (SiO_2)

pH＞9の領域では飽和であるが, pH＜9の領域ではやや過飽和である。

② アルバイト ($NaAlSi_3O_8$)

pH＝8～10の領域においてほとんどが飽和であるが, pH＞9.5 の領域では不飽和のものも含まれる。

---

1) : EQ3/6 のマニュアル (Wolery, 1983) には, 鉱物の飽和状態を推定する場合の基準値として, 熱力学親和力 (Thermodynamic Affinities) をもとに, 以下の値が推薦されている。

A (熱力学親和力) の絶対値＜0.50の場合 ⇨ 飽和 (平衡)

上記の値は, EQ3/6 のデータファイル (DATA0. 3245R54) にまとめられている各鉱物の熱力学データの不確実性 (uncertainty)および水質分析における一般的な分析誤差を考慮して, Woleryにより推薦されているものである (Wolery, 私信)。

熱力学親和力と飽和指数には以下の関係がある。

A (熱力学親和力) ＝2.303RTlog(IAP/Ksp) ＝ 2.303RT×SI

ここで, R＝1.987 $\times 10^{-3}$(kcal K^{-1} mol^{-1}), T＝298 K

従って, 鉱物の飽和状態を飽和指数 (SI) をもとに推定する場合の基準値は,

SIの絶対値＜0.37の場合 ⇨ 飽和 (平衡)

となる。

③ アノーサイト（$CaAl_2Si_2O_8$）

pH＝8～10の領域において不飽和である。

④ 方解石（$CaCO_3$）

pH<8.5 の領域では不飽和である。pH>8.5 の領域では，やや過飽和のものも含まれるが，ほとんどは飽和である。

⑤ カリ長石（$KAlSi_3O_8$）

一試料を除くと，pH＝8～10の領域において過飽和である。

⑥ 金雲母[2]（$K_2Mg_6(Si_6Al_2)O_{20}(OH)_4$）

pH＝8～10の領域において，pHの上昇につれて不飽和⇨飽和⇨過飽和になる傾向がある。pH＝9.5 付近では，ほぼ飽和である。

⑦ 濁沸石（$CaAl_2Si_4O_{12}\cdot 4H_2O$）

pH＝8～10の領域において過飽和である。pHの上昇につれて飽和に近づく傾向が認められる。

⑧ 緑簾石[3]（$Ca_2Al_2Fe^{3+}Si_3O_{12}(OH)$）

pH＝8～10の領域において過飽和である。

---

2)：黒雲母は金雲母，アナイト，イーストナイトおよびシデロフィライトの4つの端成分をもつ固溶体である（黒田ほか，1983）。各々の端成分の化学式を以下に記す。

・金雲母（$K_2Mg_6(Si_6Al_2)O_{20}(OH)_4$），・アナイト（$K_2Fe_6(Si_6Al_2)O_{20}(OH)_4$）

・イーストナイト（$K_2Mg_5Al(Si_5Al_3)O_{20}(OH)_4$）

・シデロフィライト（$K_2Fe_5Al(Si_5Al_3)O_{20}(OH)_4$）

データファイル中に含まれる端成分は，金雲母およびアナイトである。今回の解析では，金雲母についての結果を示してある。因みにアナイトは，pH＝8～10の領域において不飽和である。

3)：天然の緑簾石の組成範囲は，大部分，クリノゾイサイトとピスタサイトの間に限られる（黒田ほか，1983）。各々の端成分の化学式を以下に記す。

・クリノゾイサイト（$Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)$）

・ピスタサイト（$Ca_2Al_2Fe^{3+}Si_3O_{12}(OH)$）

今回の解析では，データファイル中にepidote として熱力学データが記されているピスタサイトの結果を示してある。因みにクリノゾイサイトは，pH＝8～10の領域において不飽和である。

⑨ 緑泥石[4] (clinochlore-14a : $Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$)

pH＝8～10の領域において，pHの上昇につれて不飽和⇨飽和⇨過飽和になる傾向がある。pH＝9.5 付近では，ほぼ飽和である。

⑩ 束沸石 ($CaAl_2Si_7O_{11}(OH)_{14}$)

pH＝8～10の領域において過飽和である。

⑪ 絹雲母[5] ($K_{0.6}Mg_{0.25}Al_{2.3}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$)

pH＝8～10の領域において，pHの上昇につれて過飽和⇨飽和⇨不飽和になる傾向がある。pH＝10付近では，ほぼ飽和である。

⑫ ぶどう石 ($Ca_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2$)

pH＜8.5 の領域では不飽和である。pH＞8.5 の領域では，やや過飽和のものも含まれるが，ほとんどは飽和である。

以上の結果から，栗橋花崗閃緑岩中の地下水のうち，pH＞9 程度の地下水については，以下の鉱物とほぼ平衡(-0.37＜SI＜0.37) であると判断される。

- 石英 (SiO_2)
- アルバイト ($NaAlSi_3O_8$)
- 方解石 ($CaCO_3$)
- ぶどう石 ($Ca_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2$)

相平衡図による検討の場合，Ca^{2+}の供給源として斜長石の端成分であるアノーサイトのカオリナイトへの風化反応が推定されたが，EQ3/6 による計算においては，アノーサイトは地下水に対して不飽和であった（図－19）。これはCa^{2+}を含む他の鉱物が地下水に対して飽和であるためと推定される。今回の計算では，Ca^{2+}を含む鉱物としては方解石およびぶどう石が地下水に対して飽和であると推定されたが，ぶどう石は割れ目充填鉱物としてわずかに認められるだけであり，地下水中のCa^{2+}は主に方解石と水との反応により支配されていると考えられる。従って，栗橋花崗閃緑岩中の地下水中に溶存する主なイオンであるNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^- およびSiO_2濃度を支配していると考えられる鉱物はアルバイト，方解石および石英である。なお，これらの鉱物の溶解反応式は以下の通りである。

---

4)：緑泥石の化学組成の一般式としては$(Mg,Fe,Al)_{12}(Si,Al)_8O_{20}(OH)_{16}$ として示され，蛇紋石とアメス石を端成分とする固溶体として表すことができる。緑泥石の組成範囲は広いが比較的よく産出するものはSi≒5.6 前後のものである（黒田ほか，1983）。今回の解析ではSi≒5.6 ～6.2 であるクライノクロアについての結果を示してある。

5)：今回の解析では，データファイル中にsericiteとしての熱力学データが記されていなかったので，illiteの熱力学データによる結果を示してある。

・アルバイトの溶解

$$NaAlSi_3O_{8\,(s)} = Na^+ + Al^{3+} + 3SiO_{2\,(aq)} + 2H_2O - 4H^+$$

・方解石の溶解

$$CaCO_{3\,(s)} = Ca^{2+} + HCO_3^- - H^+$$

・石英の溶解

$$SiO_{2\,(s)} + 2H_2O = Si(OH)_{4\,(aq)}$$

3．3　平衡論的アプローチの適用性

地下深部の地下水水質形成機構を理論的に考察する上でのアプローチとしては，熱力学データを用いた平衡論的アプローチおよび速度論的アプローチの2通りがある。滞留時間の長い地下水の場合，地下水流れに沿って生ずる岩石－水反応時間も非常に長いと予想されるため，その様な地下水の水質を理論的に考察する場合，平衡論的アプローチが適切であると考えられている（油井ほか，1992）。油井らは平衡論モデルを用い，深部地下水水質のモデル化を行い，4種類のモデル地下水を想定している。

栗橋花崗閃緑岩中の地下水の起源とpHに関しては，油井ほか（1992）で想定されたモデル地下水のうち降水系高pHタイプに相当する。降水系高pHタイプの地下水をモデル化した際に考慮した地下水中のNa^+，Ca^{2+}およびSiO_2濃度を支配する反応は，

Na^+：アルバイトとカオリナイト間の化学平衡

Ca^{2+}：方解石と水溶液間の溶解平衡

SiO_2：石英と水溶液間の溶解平衡

である。

これらの反応に係わる鉱物は，pH＞9程度の栗橋花崗閃緑岩中の地下水のNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^-およびSiO_2濃度を支配していると考えられる鉱物に含まれる。

EQ3/6による熱力学的解析に用いた坑道壁面からの湧水は，トリチウムが検出されており，これらの地下水の年代は古くとも40年程度であると推定される。この様な比較的滞留時間の短い（岩石／水反応時間の短い）栗橋花崗閃緑岩中の地下水についても，pH＞9程度であれば，地下水中のNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^-およびSiO_2濃度を支配していると推定される鉱物の溶解反応式を組み合わせて，平衡論的アプローチにより，地下水中のNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^-およびSiO_2濃度を近似できる可能性があると考えられる。

3．4　深度方向での水質タイプの変化

2．3．2項で示した様に栗橋花崗閃緑岩中の地下水は，比較的浅部では$Ca-HCO_3$型であるが，より深部になると$Na-HCO_3$型になるような深度方向での水質タイプの変化傾向が認められる。地下水のpHは深度とともに弱酸性－中性から弱アルカリ性へと変化する傾向があるので，深度を地下水のpHで言い換えると，pHが高くなるとともに水質タイプは$Ca-HCO_3$型から$Na-HCO_3$型に変化する傾向があると言える。

そこで，深度方向での水質タイプの変化傾向を考察するため，地下水のpHと地下水中のNa^+，Ca^{2+}および炭酸濃度（$HCO_3^-+CO_3^{2-}$）との関係を整理してみた。

図－22に栗橋花崗閃緑岩中の地下水のpHとNa^+，Ca^{2+}および炭酸濃度との関係を示す。地下水中のNa^+は，pHが高くなるとともに増加する傾向が認められ，Na^+濃度は$Ca-HCO_3$型より$Na-HCO_3$型の方が大きい傾向が認められる。一方，地下水中のCa^{2+}および炭酸は，pH≒9あたりまではpHが高くなるとともに，やや増加する傾向が認められるが，pH＝9～10の領域では減少する傾向が認められる。またCa^{2+}および炭酸濃度は，$Ca-HCO_3$型より$Na-HCO_3$型の方がやや小さくなる傾向が認められる。

以上の様な地下水のpHと地下水中のNa^+，Ca^{2+}および炭酸濃度との関係から，水質タイプの変化は，pH＝9～10の領域で減少するCa^{2+}および炭酸濃度による影響と推定される。

そこで，Ca^{2+}および炭酸濃度に関連する鉱物である方解石について，そのSIをもとに考察する。

図－23にEQ3/6 により計算された栗橋花崗閃緑岩中の地下水に対する方解石のSIをpHを横軸にとってまとめたものを示す。

3．3項の(3)で示した様に，栗橋花崗閃緑岩中の地下水は方解石に関してほぼ平衡であるといえる。しかしながら，pHの低い領域では方解石に関して不飽和になる傾向が認められ，またpHの高い領域ではほとんどは飽和であるが，やや過飽和なものも認められる。したがってpH＝9～10のようなpHの高い領域では，地下水が方解石に対して過飽和になり，$Ca^{2+}+HCO_3^- \Rightarrow CaCO_3+H^+$ の反応により溶液中から方解石が沈澱することにより，地下水中のCa^{2+}およびHCO_3^-が減少し，水質のタイプが変化することが考えられる。

花崗岩中での深度方向での水質タイプの変化（$Ca-HCO_3$型⇨$Na-HCO_3$型）の原因としては，方解石の沈澱による影響とともに粘土鉱物や沸石類のイオン交換反応による影響についても報じられている（Gascoyne, 1988）。佐藤ら（1992）は室内でのバッチ式試験を行い，花崗岩類に加えスメクタイトや沸石を加えた試験系では，スメクタイトや沸石によるイオン交換反応により，水質は$Na-HCO_3$型になることを報じている。釜石の地下水に関しても，森田ら（1991）による水質データの多変量解析から，深部の$Na-HCO_3$型地下水についてはイオン交換反応による影響が示唆されている。2．2項に示す様に，栗橋花崗閃緑岩中の割れ目充填部には，主な構成鉱物として沸石類等が同定されており，水質タイプの変化（$Ca-HCO_3$型⇨$Na-HCO_3$型）の原因として，沸石類等によるイオン交換反応の寄与も考えられる。

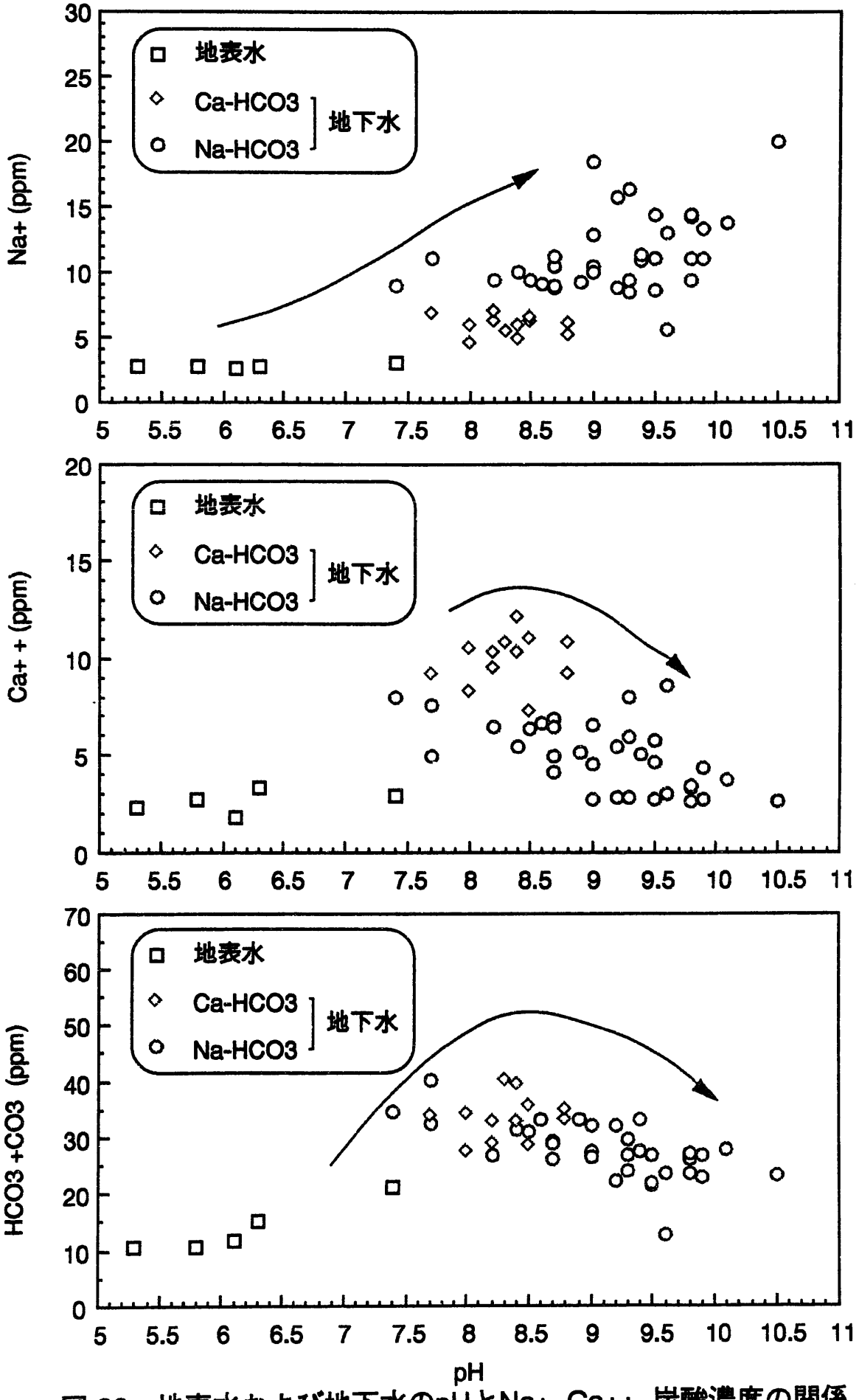
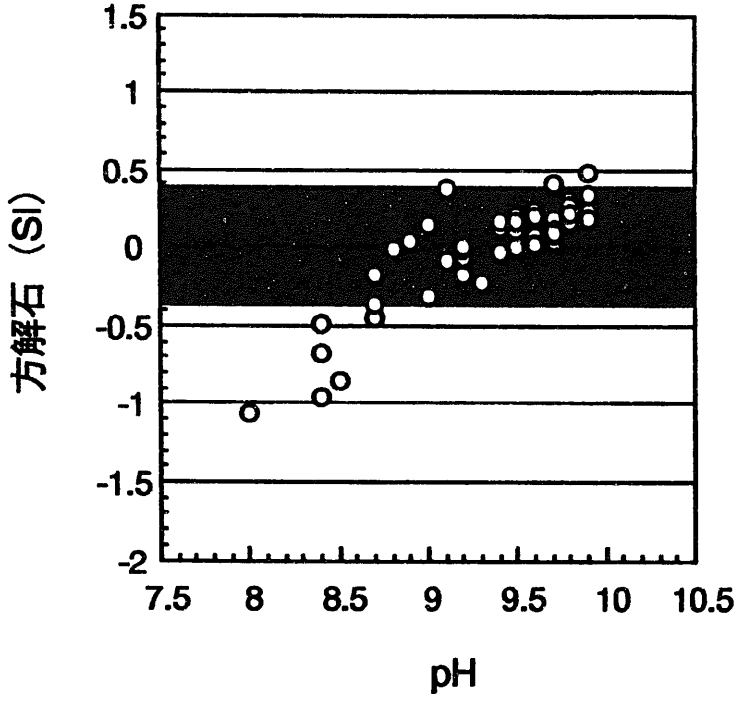


図-22　地表水および地下水のpHとNa+, Ca++, 炭酸濃度の関係



log(IAP/Ksp)=SI(Saturation Index)

過飽和	SI > 0.37	溶液からの沈殿
飽和	-0.37 < SI < 0.37	平衡
不飽和	SI < -0.37	溶液への溶解

SI > 0.37　　$CaCO_3 + H^+ \longleftarrow Ca^{++} + HCO_3^-$　　溶液中のCa^{++}およびHCO_3^-の減少

-0.37 < SI < 0.37　　$CaCO_3 + H^+ \longleftrightarrow Ca^{++} + HCO_3^-$　　溶液中のCa^{++}およびHCO_3^-の濃度変化なし

SI < -0.37　　$CaCO_3 + H^+ \longrightarrow Ca^{++} + HCO_3^-$　　溶液中のCa^{++}およびHCO_3^-の増加

図-23　EQ3/6による釜石地下水に対する方解石の飽和指数計算結果

4．まとめ

釜石原位置試験の第1フェーズおよび第2フェーズの平成6年度までに取得した栗橋花崗閃緑岩中の地下水の地球化学データをとりまとめ，実測された地下水水質の特徴を整理した。また，岩石・鉱物データおよび地下水水質データをもとに地球化学コードを利用した熱力学的解析により，栗橋花崗閃緑岩中の地下水水質形成機構に関する予察的考察を行った。以下に本報告内容をまとめる。

① 地下水の水素・酸素安定同位体分析結果から，地下水は降水起源であると推定される。

② 地下水中のトリチウム濃度分析結果から，坑道湧水およびKG-1孔の地下水の滞留時間は古くとも40年程度であると推定される。KH-1孔にはトリチウムがほとんど検出されないものが存在し，より古い地下水であると推定される。

③ 栗橋花崗閃緑岩中の地下水には，深度方向で以下の様な傾向が認められる。
- ECは深度が増すと増加する（20μS/cm⇨ 130μS/cm程度）。
- 地下水中の蒸発残留物は深度が増すと増加する（25ppm ⇨100ppm程度）。
- pHは深度とともに弱酸性－中性（pH＝5.3-7.4 ）から弱アルカリ性（pH＝10.5）へと変化する。
- SiO_2濃度は深度が増すと増加する（SiO_2＝10ppm ⇨27ppm 程度）。
- Na^+ 濃度は深度が増すと増加する（Na^+ ＝3ppm ⇨20ppm 程度）。
- 550mレベル坑道の地下水中のCa^{2+}濃度は，250mレベル坑道およびそれ以深の地下水中のCa^{2+}濃度よりもやや高い。
- 550mレベル坑道の地下水の炭酸濃度（HCO_3^- ＋CO_3^{2-} ）は，250mレベル坑道およびそれ以深の地下水の炭酸よりもやや高く，Ca^{2+}濃度と同じ傾向である。
- SO_4^{2-} 濃度の深度に依存する顕著な傾向は認められない。

④ KG-1孔の地下水中には硫酸塩還元細菌が生息し，硫酸塩還元細菌の活性領域図に基づき考察すると，KG-1孔には還元性と推定される地下水が存在する。

⑤ 比較的浅部の地下水は$Ca-HCO_3$型であるが，より深部になると地下水は$Na-HCO_3$型になるような深度方向での水質タイプの変化傾向が認められる。

⑥ 深度方向での水質タイプの変化（$Ca-HCO_3$型⇨$Na-HCO_3$型）の原因として，方解石の沈澱や沸石類等によるイオン交換反応の影響が考えられる。

⑦ 地下水水質の熱力学的解析から，pH＞9程度の地下水中のNa^+，Ca^{2+}，HCO_3^- およびSiO_2濃度に関しては鉱物－水反応を平衡論的に考察することで説明できる可能性があると考えられる。

5．今後の課題

(1) 地下水の水質

地下水の滞留時間に関しては，KH-1孔のトリチウムがほとんど検出されない地下水について，より古い地下水年代測定が可能な^{14}Cによる年代測定を実施し，^{14}C年代を求める。また得られた^{14}C年代をもとに，KH-1孔に存在する地表水よりもδD，δ^{18}Oの低い地下水が同位体の高度効果による影響か，温度効果による影響かを判別する必要がある。

(2) 深度方向での水質タイプの変化

釜石の岩石・鉱物を用いた室内試験により，水質タイプの変化（Ca－HCO_3型⇨Na－HCO_3型）と方解石の沈澱や沸石類等によるイオン交換反応との関連性について調べる必要がある。また今回の予察的考察では，主に深度方向での地下水水質データをもとに行っており，今後は深度方向での岩石・鉱物の風化度についても調査し，地下水水質と関連づけて考察する必要がある。

(3) 地下水中の主な陰イオンの起源

地下水中の主な陰イオンである炭酸（HCO_3^- ＋CO_3^{2-} ）や硫酸（SO_4^{2-} ）の起源を推定するため，今後，地下水，岩石（鉱物），土壌等のC（炭素）やS（硫黄）の同位体分析を行い，地下水中の炭酸や硫酸中のCやSの起源に関する情報を取得する必要がある。

(4) 平衡論モデル適用性の検討

pH 9 程度以上の栗橋花崗閃緑岩中の地下水については，土壌の影響を考慮すると共にアルバイト，方解石および石英の溶解反応を用いて，部分的平衡論の組み合わせに基づく地下水のモデル計算を行い，実測された地下水中のNa^+ ，Ca^{2+}，HCO_3^- およびSiO_2濃度と比較し，モデルの適用性を検討する必要がある。モデルの適用性が確認されれば，油井ほか（1992）で降水系高pHタイプの地下水のモデル化に際して地下水のpH，Na^+ ，Ca^{2+}，HCO_3^- およびSiO_2濃度を支配する反応として抽出された地球化学反応が適切であることを確認できる。

6．謝辞

本報告書の作成にあたって，日鉄鉱業株式会社・同和工営株式会社・動燃東濃地科学センター技術開発課分析Grには，地下水の分析をお願いした。動燃東濃地科学センターの太田久仁雄氏には，鉱物のＸ線分析データを提供して頂いた。日鉄鉱業株式会社の森田誠也氏，有限会社釜鉱産業の佐々木栄吉氏，佐々木好徳氏および八重樫剛氏には，地下水の物理化学パラメータ測定や採水・分析にあたって終始お世話になった。有限会社釜鉱産業の金浜敬悦氏，釜石鉱山株式会社の佐分浩氏には釜石鉱山内での調査に際し，いろいろ便宜を図っていただいた。また，釜石事務所所長の山崎眞一氏には貴重なコメントを頂いた。以上の方々に，深く感謝致します。

7．参考文献

Craig, H. : Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, 1702-1703 (1961)

Fukunaga, S., et al. : Experimental investigation on the active range of sulfate-reducing bacteria for geological disposal, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol. 353, 173-180 (1995)

Gascoyne, M., et al. : Geochemical and isotopic characterization of flow in fractured plutonic rocks - Examples from the Canadian shield, Proceedings fourth Canadian/American conference on hydrogeology, 20-31 (1988)

浜辺修二ほか：岩手県釜石鉱山付近の地質構造，鉱山地質 26, 93-104 (1976)

半谷高久ほか：水質調査法，丸善株式会社 (1960)

ＩＡＥＡ : Environmental Isotope Data No. 8, Technical Reports Series No. 264, ＩＡＥＡ (1986)

Jorgensen, B. B., : Mineralization and the bacterial cycling of carbon nitrogen and sulphur in marine sediments, Contemporary Microbial Ecology, Academic Press (1980)

金属鉱業事業団：昭和51年度精密調査報告書遠野地域 (1976)

金属鉱業事業団：昭和52年度精密調査報告書遠野地域 (1977)

黒田吉益ほか：偏光顕微鏡と岩石鉱物，共立出版株式会社 (1983)

Laaksoharju, M., et al. : An approach to quality classification of deep groundwaters in Sweden and Finland, SKB-TR 93-27 (1993)

松尾禎士：地球化学，講談社，266p (1990)

松葉谷 治：地熱水の同位体地球化学・1，地熱エネルギー Vol. 10 No. 2 , 25-39 (1985)

松田庄蔵ほか：フミン酸，リグニンスルホン酸ナトリウムのけい光法による同時定量－堆積物中のフミン酸，フルボ酸の定量－，分析化学，20，341-346 (1979)

森田誠也ほか：深部結晶質岩中の化学的特性とその挙動（その１），応用地質 32，11-22 (1991)

那須義和ほか：水の分析 第４版，日本分析化学会北海道支部編 (1994)

日本工業標準調査会：イオン電極方法通則，JIS K 0122 (1981)

Nordstrom, D.K., et al. : Geochemical thermodynamics, 2nd ed. Blackwell 493p (1994)

笹本 広ほか：釜石鉱山250mレベル坑道における割れ目特性の予察的調査，PNC TN7410 93-032 (1993)

佐藤和彦ほか：花崗岩類の地下水経路における鉱物－水反応の実験的評価，Proceedings of the 2nd Symposium on Geo-Environments, 157-162 (1992)

Stumm, W., et al. : Aquatic chemistry, 2nd ed. Wiley 780p (1981)

Wikberg, P. : The chemistry of deep groundwaters in crystalline rock. Ph.D., The Royal Institute of Technology, Stockholm (1987)

Wolery, T.J. : EQ3NR a computer program for geochemical aqueous speciation-solubility calculations, user's guide and documentation. Lawrence Livermore Laboratory (UCRL-MA-110662 PT-I). 66p (1983)

Wolery, T.J. : 私信 (1996)

山本荘毅：新版地下水調査法，古今書院 (1983)

油井三和ほか：高レベル廃棄物地層処分システムの性能評価における地下水の地球化学的特性に関するモデル化，PNC TN8410 92-166 (1992)